

Grado en Ingeniería Mecánica  
Curso 2016-2017

Trabajo de Fin de Grado

---

***Estudio del  
comportamiento de un STU  
utilizando fluidos dilatantes***

---

Autor

---

***Don David Porrero Blanco***

---

Tutor

---

***Don Andrés Gómez Morón***

---

Departamento de Ingeniería Mecánica

Leganés, Julio de 2017



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## *Agradecimientos*

---

Quisiera agradecer en primer lugar a mi tutor por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto, así como por su ayuda y orientación durante la realización del mismo.

En segundo lugar a mis compañeros del grado, con los que he compartido estos maravillosos cuatro años. Mención especial para mis amigos Pablo y Dani, por todos los trabajos y prácticas de laboratorio que hemos realizado entre los tres.

También agradecer a mi familia y especialmente a mis abuelos que sé que se sentirán muy orgullosos de verme acabar la carrera.

---

## *Abstract*

---

Shock Transmission Units (STU) are anti-seismic devices whose response changes with the velocity of the excitation given. Despite being simple and reliable, their use is not widely extended due to the lack of information about them.

They contain a non-Newtonian fluid responsible for their behavior. The aim of this project is to determine whether or not Shear Thickening Fluids (STF), those whose viscosity increases as shear rate rises, are suitable for being used in STUs.

As is the case with STUs, STFs are not widely known, so another purpose is to deepen in the understanding while laying the groundwork for their behavior.

With this purpose, two fluids have been synthesized and then rheologically tested. Afterwards, a mathematical model of the behavior of an STU developed by the department of Mechanical Engineering is established.

---

## *Resumen*

---

Los STU (Unidades de Transmisión de Choque) son dispositivos antisísmicos de respuesta variable en función la velocidad de aplicación de la carga. Pese a ser dispositivos simples y fiables su uso no está muy extendido debido a la falta de información sobre los mismos.

Para su funcionamiento necesitan fluidos no-newtonianos en su interior, y el objetivo de este proyecto es determinar la idoneidad o no de los fluidos dilatantes (STF), aquellos que aumentan su viscosidad con la velocidad de deformación.

Al igual que los STU, los fluidos STF son poco conocidos, por lo que también se pretende profundizar en la compresión de los mismos llegando a establecer las bases de su comportamiento.

Con ese objetivo se han sintetizado dos fluidos de este tipo para su caracterización reológica, y una vez hecho esto se ha procedido a establecer un modelo numérico del comportamiento de un STU desarrollado por el departamento de Ingeniería Mecánica a partir de los datos obtenidos.

---

<i>Índice de Contenido</i>	I
----------------------------	---

---

<i>Índice de Figuras</i>	V
--------------------------	---

---

<i>Índice de Tablas</i>	IX
-------------------------	----

---

# *Índice de Contenido*

---

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos del proyecto .....	2
1.2. Estructura del proyecto.....	3
<b>Capítulo 2. Marco Regulador</b>	<b>5</b>
2.1. Notación .....	6
<b>Capítulo 3. Dispositivos de Transmisión de Choque (STU)</b>	<b>9</b>
3.1. Funcionamiento .....	10
3.2. Elementos del STU.....	11
3.2.1. Cilindro .....	12
3.2.2. Vástago .....	12
3.2.3. Pistón.....	12
3.2.4. Orificios.....	12
3.2.5. Sellado.....	12
3.2.6. Cabezales de fijación.....	13
3.2.7. Polaina.....	13
3.2.8. Fluido de trabajo .....	13
3.3. Parámetros de diseño .....	14
3.3.1. Determinación del dispositivo .....	14
3.3.1.1. <i>Parámetros característicos</i> .....	14
3.3.1.2. <i>Documentación</i> .....	15
3.3.2. Requisitos de diseño .....	16
3.3.2.1. <i>Requisitos fundamentales</i> .....	16
3.3.2.2. <i>Requisitos funcionales</i> .....	16
3.3.2.3. <i>Requisitos estructurales y mecánicos</i> .....	16
3.3.3. Requisitos de cálculo.....	17
3.3.3.1. <i>Determinación de las propiedades</i> .....	17
3.3.3.2. <i>Consideraciones ambientales</i> .....	17
3.4. Ciclo de vida y mantenimiento .....	18
3.4.1. Mantenimiento .....	18
3.5. Pruebas de ensayo .....	19
3.5.1. Ensayo de Estanqueidad.....	20
3.5.2. Ensayo de Presión.....	21
3.5.3. Ensayo a baja velocidad.....	21
3.5.3.1. <i>Prueba AASHTO</i> .....	21

3.5.3.2.	<i>Variante I de la norma UNE-EN</i> .....	22
3.5.3.3.	<i>Variante II de la norma UNE-EN</i> .....	22
3.5.4.	Ensayo de alta velocidad.....	22
3.5.5.	Ensayo de carga impulsiva o simulación dinámica.....	23
3.5.5.1.	<i>Prueba AASHTO</i> .....	23
3.5.5.2.	<i>Prueba UNE-EN</i> .....	24
3.5.6.	Ensayo de carga cíclica.....	25
3.5.7.	Ensayo de sobrecarga.....	25
3.5.7.1.	<i>Prueba AASHTO</i> .....	25
3.5.7.2.	<i>Prueba UNE-EN</i> .....	25
3.5.8.	Ensayo de fatiga .....	26
<b>3.6.</b>	<b>Aplicaciones actuales .....</b>	<b>26</b>
3.6.1.	Dispositivo anti-sísmico en puentes.....	26
3.6.2.	Dispositivo anti-sísmico en edificios .....	27
3.6.2.1.	<i>Aparcamientos de varias plantas</i> .....	27
3.6.2.2.	<i>Edificios de planta variable</i> .....	28
3.6.2.3.	<i>Edificios muy próximos</i> .....	28
3.6.2.4.	<i>Patrimonio arquitectónico</i> .....	28
<b>3.1.</b>	<b>Derivados del STU .....</b>	<b>28</b>
3.1.1.	Amortiguador viscoso (VD) .....	29
3.1.2.	Snubbers .....	30
3.1.2.1.	<i>Características constructivas</i> .....	31
3.1.2.2.	<i>Funcionamiento</i> .....	31
3.1.3.	Amortiguadores de Resorte Pretensados (PSD) .....	32
3.1.4.	Reston® SA .....	33
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Fluidos Dilatantes .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1.</b>	<b>Reología .....</b>	<b>35</b>
4.1.1.	Tipos de fluidos.....	36
4.1.2.	Viscosidad .....	37
4.1.3.	Modelos reológicos.....	38
<b>4.2.</b>	<b>Fluidos Espesantes (STF).....</b>	<b>39</b>
4.2.1.	Explicación física .....	40
4.2.1.1.	<i>Teoría de orden y desorden (ODT)</i> .....	41
4.2.1.2.	<i>Teoría de agrupación hidroeléctrica</i> .....	41
4.2.2.	Factores que afectan al comportamiento espesante .....	42
4.2.2.1.	<i>Concentración del sólido o grado de empaquetamiento (<math>\phi</math>)</i> .....	42
4.2.2.2.	<i>Tamaño de la partícula</i> .....	43
4.2.2.3.	<i>Forma de la partícula</i> .....	44



4.2.2.4.	<i>Heterogeneidad de las partículas</i> .....	44
4.2.2.5.	<i>Interacciones entre partículas</i> .....	45
4.2.2.6.	<i>Viscosidad del líquido</i> .....	45
4.2.3.	Tipos de comportamiento espesante.....	45
4.2.3.1.	<i>Comportamiento espesante continuo (CST)</i> .....	46
4.2.3.2.	<i>Comportamiento espesante discontinuo (DST)</i> .....	46
4.2.4.	Modelo Reológico Dilatante .....	47
<b>4.3.</b>	<b>Comportamiento viscoelástico</b> .....	<b>49</b>
<b>Capítulo 5. Metodología de fabricación de STF</b>		<b>53</b>
<b>5.1.</b>	<b>Materiales utilizados</b> .....	<b>53</b>
5.1.1.	Sílice pirógena.....	54
5.1.2.	Polipropilenglicol (PPG).....	54
<b>5.2.</b>	<b>Método de mezcla</b> .....	<b>55</b>
<b>Capítulo 6. Caracterización reológica de los fluidos</b>		<b>61</b>
<b>6.1.</b>	<b>Procedimiento</b> .....	<b>62</b>
6.1.1.	“Flow Ramp” .....	62
6.1.2.	Ensayos oscilatorios.....	63
6.1.2.1.	<i>Ensayos Oscilatorios con Frecuencia Angular Constante</i> .....	66
6.1.2.2.	<i>Ensayos Oscilatorios con Amplitud de Deformación Constante</i> .....	66
6.1.2.3.	<i>Condiciones de los Ensayos Oscilatorios</i> .....	66
6.1.3.	Secuencia seguida .....	67
<b>6.2.</b>	<b>Regla de Cox-Mertz modificada</b> .....	<b>67</b>
<b>Capítulo 7. Modelos de comportamiento de STU</b>		<b>69</b>
<b>7.1.</b>	<b>Modelo de Jie Liang</b> .....	<b>70</b>
<b>7.2.</b>	<b>Modelo de Spencer</b> .....	<b>73</b>
<b>Capítulo 8. Resultados</b>		<b>79</b>
<b>8.1.</b>	<b>Ensayos reológicos</b> .....	<b>79</b>
8.1.1.	Mezcla 1 (20%).....	79
8.1.1.1.	<i>Flow Ramp 3</i> .....	79
8.1.1.1.	<i>Ensayos oscilatorios de frecuencia angular constante</i> .....	80
8.1.1.2.	<i>Ensayos oscilatorios de amplitud de deformación constante</i> .....	81
8.1.1.3.	<i>Regla de Cox-Mertz modificada</i> .....	85
8.1.1.4.	<i>Caracterización del fluido</i> .....	87
8.1.2.	Mezcla 2 (15%).....	89
8.1.2.1.	<i>Flow Ramp 3</i> .....	89
8.1.2.2.	<i>Ensayos oscilatorios de frecuencia angular constante</i> .....	90

8.1.2.1. Ensayos oscilatorios de amplitud de deformación constante .....	91
8.1.2.2. Regla de Cox-Mertz modificada .....	96
8.1.2.3. Caracterización del fluido.....	98
8.1.1. PPG .....	100
<b>8.2. Predicciones de comportamiento en base a ensayos reológicos .....</b>	<b>102</b>
8.2.1. Según el Modelo de Jie Liang .....	102
8.2.1.1. Estimación con mezcla al 20%.....	102
8.2.1.2. Estimación con mezcla al 15%.....	103
8.2.2. Según el modelo de Spencer .....	105
8.2.2.1. Mezcla al 20%.....	105
8.2.2.1. Mezcla al 15%.....	106
<b>Capítulo 9. Conclusiones .....</b>	<b>109</b>
9.1. Caracterización reológica de los fluidos .....	109
9.2. Modelos de STU .....	109
9.3. Trabajos futuros.....	111
<b>Capítulo 10. Entorno socio-económico .....</b>	<b>113</b>
10.1. Impacto económico .....	113
10.2. Presupuesto.....	113
10.3. Impacto social .....	114
10.4. Impacto ambiental.....	114
<b>Anexo A. Glosario .....</b>	<b>117</b>
<b>Anexo B. Características de los materiales utilizados .....</b>	<b>119</b>
B.1. Polipropilenglicol.....	119
B.2. Sílice pirógena.....	120
<b>Anexo C. Características y planos del STU .....</b>	<b>123</b>
C.1. Dimensiones relevantes.....	123
C.2. Planos.....	123
C.2.1. Vástago .....	123
C.2.2. Tapa 2 .....	125
C.2.3. Tapa 1 .....	126
C.2.4. Cuerpo.....	127
<b>Referencias .....</b>	<b>129</b>

---

## Índice de Figuras

Figura 1.1:	Mapa de riesgo de terremoto en el mundo [1] .....	1
Figura 2.1:	Marcado de conformidad de un Dispositivo de unión rígida [3].....	5
Figura 2.2:	Vista en alzado y planta de un STU [3] .....	6
Figura 3.1:	STU instalados en un puente [5] .....	9
Figura 3.2:	Representación de una deslizadora (izquierda) y un empotramiento (derecha) .....	9
Figura 3.3:	Curvas de fuerza (reacción) frente al tiempo en condiciones de servicio (Izquierda) y en caso de carga repentina (Derecha) [6] .....	10
Figura 3.4:	Esquema de un sistema STU [6].....	11
Figura 3.5:	Vista en corte tridimensional de un STU [8] .....	14
Figura 3.6:	Curvas de desplazamiento (a) y fuerza de reacción (b) frente al tiempo en un ensayo a baja velocidad según AASHTO [10] .....	21
Figura 3.7:	Curvas de desplazamiento (a) y fuerza de reacción (b) frente al tiempo en un ensayo a alta velocidad según AASHTO [10] .....	23
Figura 3.8:	Curvas de fuerza de reacción (a) y desplazamiento (b) frente al tiempo en un ensayo de simulación dinámica según AASHTO [10] .....	23
Figura 3.9:	Curvas de fuerza (Y) frente al tiempo (X) en un ensayo a alta velocidad según UNE [3] .....	24
Figura 3.10:	Curvas de desplazamiento (Y) frente al tiempo (X) en un ensayo a alta velocidad según UNE [3].....	25
Figura 3.11:	Puente convencional sometido a un esfuerzo longitudinal [11].....	27
Figura 3.12:	Puente con STU sometido a un esfuerzo longitudinal [11].....	27
Figura 3.13:	Edificio de planta variable conectado mediante STU [2]. NOTA: el espacio de la junta de dilatación se ha exagerado en el dibujo .....	28
Figura 3.14:	Dos edificios próximos conectados mediante STU [2] .....	28
Figura 3.15:	Vista en CAD de un Amortiguador Viscoso [12].....	29
Figura 3.16:	Evolución de la Reacción con la carrera en un Amortiguador Viscoso a baja y alta velocidad [11] .....	29
Figura 3.17:	Detalle de un Amortiguador Viscoso [11] .....	30
Figura 3.18:	Vista de un Snubber [14].....	31
Figura 3.19:	Vista esquemática de un “Snubber” [2].....	31
Figura 3.20:	Evolución temporal de un evento sísmico (arriba) y fuerza de reacción (abajo) [2] .....	32
Figura 3.21:	Dispositivo PSD [12] .....	33
Figura 3.22:	Reston® SA [15] .....	33
Figura 4.1:	Deformación de un sólido elástico (izquierda) y de un fluido ideal (derecha) bajo un esfuerzo de cizallamiento aplicado a través de una placa paralela [16].....	35
Figura 4.2:	Esquema de clasificación de los materiales en función de sus propiedades reológicas [18].....	36
Figura 4.3:	Clasificación de los fluidos en base a sus propiedades reológicas [19] .....	36
Figura 4.4:	Curvas de fluidez (izquierda) y de viscosidad (derecha) en función de la velocidad de cizalla (velocidad de deformación) de un fluido dilatante [16] .....	40
Figura 4.5:	Partículas de un fluido dilatante en reposo (izquierda) y bajo la aplicación de esfuerzo de cizallamiento (derecha) [24] .....	41
Figura 4.6:	Variación de la curva (en escala logarítmica) viscosidad frente a velocidad de cizalla con el grado de empaquetamiento. Las curvas superiores representan un mayor grado de empaquetamiento [23] .....	42
Figura 4.7:	Variación de la velocidad de cizalla mínima con el factor de empaquetamiento (%) [23] .....	43
Figura 4.8:	Variación de la velocidad de cizalla mínima con el tamaño de partícula [26].....	43

Figura 4.9: Diferentes curvas Viscosidad frente a velocidad de cizalla para mezclas con partículas en forma de varilla, placa, granular y esférica [26] .....	44
Figura 4.10: Curvas de Viscosidad Relativa frente al grado de empaquetamiento para mezclas de uno, dos, tres y cuatro solutos respectivamente [23] .....	45
Figura 4.11: Evolución de la viscosidad con el esfuerzo cortante para distintos grados de empaquetamiento [21] .....	47
Figura 4.12: Evolución del esfuerzo cortante con la velocidad de cizalla para distintos grados de empaquetamiento [21] .....	47
Figura 4.13: Curva de comportamiento de Aerosil® R816, se distinguen las etapas fluidificantes (I y III), así como la dilatante (II), nótese que la escala es logarítmica [20].....	49
Figura 4.14: Relajación de esfuerzo para diferentes medios [18] .....	50
Figura 5.1: Sílice pirógena empleada.....	54
Figura 5.2: Balance de fuerza para predecir el espesamiento en coloides a base de polímero [23] .....	55
Figura 5.3: Varillas de laboratorio empleadas para mezclar .....	55
Figura 5.4: Trozo de botella empleado para pesar la sílice.....	56
Figura 5.5: Vaso empleado para pesar el PPG .....	56
Figura 5.6: Báscula empleada para pesar los productos .....	56
Figura 5.7: Mezclador eléctrico .....	57
Figura 5.8: 2ª mezcla cuando se ha echado aproximadamente el 50% de la sílice total empleada .....	58
Figura 5.9: Etapa granular de la 2ª mezcla con toda la sílice vertida .....	58
Figura 5.10: 1ª mezcla (20 %).....	59
Figura 5.11: 2ª mezcla (15 %).....	59
Figura 6.1 TA Instruments AR2000ex .....	61
Figura 6.2 Fluido ajustado en un reómetro de platos paralelos [32].....	61
Figura 6.3: Señales de deformación (Strain) y esfuerzo (Stress) para un sólido (izquierda) y para un fluido viscoso (derecha) [32] .....	63
Figura 6.4: Descomposición de la señal de esfuerzo [18].....	64
Figura 6.5: Representación geométrica de los parámetros Viscoelásticos [32] .....	65
Figura 7.1: Fuerza de reacción frente a la velocidad del fluido [6] .....	69
Figura 7.2: Diagrama de fuerza teórica frente a la carrera [11].....	70
Figura 7.3: Parámetros del modelo [10].....	71
Figura 7.4: Distribución de velocidades en el orificio según el modelo [34] .....	72
Figura 7.5: Fluido atravesando el orificio del STU [35].....	74
Figura 7.6: Modelo de platos paralelos [35] .....	74
Figura 7.7: Composición de las fuerzas que actúan en el STU según el modelo de Spencer [35].....	76
Figura 8.1: Viscosidad en función de la velocidad (en escala logarítmica) de la mezcla al 20%. Datos obtenidos experimentalmente.....	79
Figura 8.2: Esfuerzo cortante en función de la velocidad (en escala logarítmica) de la mezcla al 20%. Datos obtenidos experimentalmente.....	80
Figura 8.3: Viscosidad compleja en función de la velocidad angular (en escala logarítmica). Las diferentes curvas representan diferentes amplitudes de deformación. ....	80
Figura 8.4: Módulos de pérdida y almacenamiento en función de la frecuencia angular para diferentes amplitudes de deformación. Datos obtenidos experimentalmente .....	81
Figura 8.5: Viscosidad compleja en función de la deformación (en escala logarítmica). Las diferentes curvas representan velocidades de cizalla diferentes. Datos obtenidos experimentalmente. ....	82
Figura 8.6: Módulos de pérdida y almacenamiento en función de la frecuencia angular para diferentes frecuencias angulares. Datos obtenidos experimentalmente .....	83

Figura 8.7: Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación bajas (región I del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente .....	84
Figura 8.8: Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación medias (región II del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente .....	84
Figura 8.9: Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación medias (región II del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente .....	85
Figura 8.10: Comparativa de la curva del ensayo Flow Ramp con los oscilatorios a deformación constante. Escala logarítmica.....	86
Figura 8.11: Comparativa de la curva del ensayo Flow Ramp con los oscilatorios a velocidad constante. Escala logarítmica. ....	86
Figura 8.12: Representación de la viscosidad en función de la velocidad (en escala logarítmica) en base a los datos (rojo) y con el modelo de Cross (azul) de la mezcla al 20%.....	87
Figura 8.13: Representación del esfuerzo cortante en función de la velocidad (en escala logarítmica) en base a los datos (rojo) y con el modelo de Cross (azul) de la mezcla al 20%.....	88
Figura 8.14: Representación de la viscosidad en función de la velocidad (en escala logarítmica) de la mezcla al 15% .....	89
Figura 8.15: Representación del esfuerzo cortante en función de la velocidad (en escala logarítmica) de la mezcla al 15% .....	90
Figura 8.16: Viscosidad compleja en función de la velocidad angular (en escala logarítmica). Las diferentes curvas representan esfuerzos cortantes diferentes. ....	90
Figura 8.17: Módulos de pérdida y almacenamiento en función de la frecuencia angular para diferentes amplitudes de deformación. Datos obtenidos experimentalmente .....	91
Figura 8.18: Viscosidad compleja en función de la deformación (en escala logarítmica). Las diferentes curvas representan velocidades de cizalla diferentes. Datos obtenidos experimentalmente. ....	92
Figura 8.19: Módulos de pérdida y almacenamiento en función de la frecuencia angular para diferentes frecuencias angulares. Datos obtenidos experimentalmente .....	93
Figura 8.20: Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación bajas (región I del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente .....	94
Figura 8.21: Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación medias (región II del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente .....	95
Figura 8.22: Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación medias (región II del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente .....	96
Figura 8.23: Comparativa de la curva del ensayo Flow Ramp con los oscilatorios a deformación constante. Escala logarítmica.....	97
Figura 8.24: Comparativa de la curva del ensayo Flow Ramp con los oscilatorios a velocidad constante. Escala logarítmica. ....	98
Figura 8.25: Representación de la viscosidad en función de la velocidad (en escala logarítmica) en base a los datos (rojo) y con el modelo de Cross (azul) de la mezcla al 15%.....	99
Figura 8.26: Representación del esfuerzo cortante en función de la velocidad (en escala logarítmica) en base a los datos (rojo) y con el modelo de Cross (azul) de la mezcla al 15%.....	100
Figura 8.27: Viscosidad en función de la deformación del PPG obtenida experimentalmente.	101
Figura 8.28: Tensión (esfuerzo cortante) en función de la deformación del PPG obtenida experimentalmente.....	101
Figura 8.29: Fuerza teórica en función de la velocidad del pistón para mezcla al 20% según Jie Liang.....	102
Figura 8.30: Comparación de los modelos de Jie Liang con el de los fabricantes .....	103
Figura 8.31: Fuerza teórica en función de la velocidad del pistón para mezcla al 15% .....	104
Figura 8.32: Comparación de los modelos de Jie Liang con el de los fabricantes .....	104

Figura 8.33: Fuerza en función de la velocidad del pistón para mezcla al 20% según Spencer.....	105
Figura 8.34: Comparación de los modelos de Jie Liang con el de los fabricantes .....	106
Figura 8.35: Fuerza en función de la velocidad del pistón para mezcla al 20% según Spencer.....	107
Figura 8.36: Comparación del modelo de Spencer con el de los fabricantes .....	107
Figura 9.1: Modelo de regresión propuesto para la mezcla al 20% .....	110
Figura 9.2: Modelo de regresión propuesto para la mezcla al 15% .....	111
Figura B.1: Bote de PPG empleado .....	119
Figura C.1: Plano del Vástago del STU .....	124
Figura C.2: Plano de la segunda parte de la carcasa .....	125
Figura C.3: Plano de la primera parte de la carcasa.....	126
Figura C.4: Plano del cuerpo .....	127

## *Índice de Tablas*

---

Tabla 2.1:	Aspectos de la norma europea tratados en este documento .....	6
Tabla 3.1:	Pruebas de ensayo de los STU [3,4].....	20
Tabla 5.1:	Cantidades de producto empleadas en las mezclas .....	57
Tabla 6.1:	Condiciones del tercer ensayo “Flow Ramp” .....	62
Tabla 6.2:	Condiciones de los ensayos oscilatorios.....	66
Tabla 6.2:	Condiciones de los ensayos oscilatorios.....	66
Tabla 8.1:	Puntos de inicio de las regiones de comportamiento de la mezcla al 20% .....	79
Tabla 8.2:	Puntos de cambio de comportamiento de la mezcla al 15% .....	89
Tabla 8.3:	Puntos de cambio de comportamiento (corregidos) de la mezcla al 15% .....	98
Tabla 10.1:	Presupuesto .....	113
Tabla B.1:	Características del producto [39].....	119
Tabla B.2:	Propiedades del producto [39] .....	119
Tabla B.3:	Características del producto [40].....	120
Tabla C.1:	Dimensiones significativas del STU .....	123

---

*Capítulo 1*  
*Introducción*

---



## Capítulo 1. Introducción

---

La asiduidad con la que se suceden eventos sísmicos en todo el mundo ha puesto de manifiesto la necesidad de proteger infraestructuras civiles de sus efectos devastadores. En este sentido, el desarrollo de dispositivos antisísmicos ha sido crucial, permitiendo salvaguardar buena parte de estas infraestructuras (mayoritariamente puentes), y seguir utilizándolas con normalidad después de que se produzca un terremoto.

Los terremotos consisten en desplazamientos de tierra con oscilaciones tridireccionales: longitudinal, transversal y vertical. Cuando sucede un terremoto las infraestructuras y edificios sufren movimientos bruscos y repentinos [1], que pueden inducir a fallos estructurales en ese momento o inducir futuros fallos a fatiga. La Figura 1.1 muestra el mapa de riesgo sísmico global.



**Figura 1.1: Mapa de riesgo de terremoto en el mundo [1]**

Aparte de la protección contra terremoto, los dispositivos antisísmicos también pueden ser útiles en otras situaciones similares desde el punto de vista de las solicitaciones en la estructura. Un ejemplo típico de esta situación es el frenado de emergencia de un ferrocarril, que ejerce una considerable fuerza longitudinal sobre la vía.

El primer dispositivo antisísmico conocido, el amortiguador viscoso, fue desarrollado en la segunda mitad del siglo XIX, aunque con una aplicación militar, la artillería. Estos dispositivos permitían reducir el efecto del retroceso de los cañones y así conseguir una mayor precisión en los disparos. Con el tiempo se fueron empleando en armas más modernas (como los lanzamisiles de los barcos de guerra) pero siguieron siendo poco utilizados en aplicaciones civiles, fundamentalmente porque al ser tecnología militar, todos los desarrollos eran secretos [2].

Los primeros modelos de STU surgieron a finales de los años 20 del siglo XX como una variante de los amortiguadores viscosos, y resultaban extraordinariamente complejos y poco fiables; hecho que disuadió a muchos ingenieros de emplearlos. En 1927, se instala por primera vez un STU en un puente, en California, E.E.U.U. A partir de ese momento empiezan a desarrollarse y surgir nuevas variantes, no solo en América, sino también en Europa [2].

Pero no fue hasta la década de los años 70 cuando los STU evolucionaron hasta convertirse en los actuales dispositivos simples y fiables que se conocen hoy en día. Aun así, sigue habiendo pocos fabricantes y con diferencias significativas entre los diseños de cada uno.

Actualmente, los dispositivos STU son ampliamente utilizados en el Sudeste Asiático y en algunos países occidentales, pero resultan bastante desconocidos en el resto; según algunos autores por la falta de información y documentación adecuada, así como la ya mencionada escasez de fabricantes [2].

Estas unidades necesitan un fluido interno, que es el responsable del comportamiento característico de estos dispositivos. Dado que este comportamiento debe variar en función de la velocidad de aplicación, se ha pensado que los fluidos dilatantes pueden ser idóneos para llevar a cabo ese cometido.

Los fluidos dilatantes son aquellos que se vuelven más viscosos a medida que se intenta removerlos más deprisa. Un ejemplo clásico de este tipo de fluidos es la mezcla de agua con maicena, popularizada en la televisión. Sin embargo, la mayoría de los fluidos no-newtonianos (concepto aplicable a todos los fluidos cuya viscosidad no es constante), presentan el comportamiento contrario (fluidificante), de ahí su rareza.

Los fluidos dilatantes han sido poco estudiados hasta ahora, pero por sus características particulares pueden resultar de gran utilidad para los STU. De hecho, no fue hasta finales del siglo XX cuando se empezó a hablar de este tipo de fluidos como tal, ya que su comportamiento es muy poco común.

### **1.1. Objetivos del proyecto**

El departamento de Ingeniería Mecánica ha desarrollado un dispositivo STU con la intención de ensayarlo una vez haya sido provisto de un fluido interno adecuado. Para ello se ha procedido a sintetizar dos mezclas de fluidos dilatantes, para posteriormente ensayarlas reologicamente.

Con el desarrollo del presente trabajo se han pretendido conseguir los siguientes objetivos:

1. Conseguir una mayor difusión de la tecnología STU, así como de sus potenciales aplicaciones y ventajas.
2. Profundizar en el conocimiento del comportamiento de los fluidos STF: viscosidad, propiedades viscoelásticas, regla de Cox-Mertz.
3. Determinar si los fluidos STF son aptos para su aplicación en los dispositivos STU.
4. Determinar cómo deben ser esos fluidos (composición) para que funcionen correctamente.
5. Establecer un modelo de comportamiento del STU.
6. Determinar qué modelo de comportamiento describe mejor el comportamiento real del dispositivo.

## 1.2. Estructura del proyecto

Este documento se compone de siete capítulos y 3 anexos, que se detallan a continuación. Cada capítulo puede contener hasta tres niveles de sub-apartados y cada anexo hasta uno.

- **Capítulo 1. Introducción:** Es el capítulo actual, recoge información previa al desarrollo del trabajo para ubicar al lector, así como diferentes aspectos comunes a todos los trabajos de fin de grado:
  - Estado del Arte
  - Objetivos
  - Estructura
- **Capítulo 2. Maco Regulador:** Recoge información de la Directiva Europea a la que se encuentran sometidos los STU, así como información sobre normas que pueden ser aplicadas y su ubicación en el presente documento.
- **Capítulo 3. Dispositivos de Transmisión de Choque (STU):** Recoge información relativa a los STU, abarcando una amplia descripción de los mismos: partes, funcionamiento, diseño, pruebas, aplicaciones y productos derivados. Para entender que es un STU los apartados más recomendables son el 3.1, el 3.2 y el 3.6.
- **Capítulo 4. Fluidos Dilatantes:** Recoge información relativa a los fluidos STF. Se empieza clasificándolos, y se da una explicación física y modelos matemáticos para determinar su comportamiento, así como los factores a tener en cuenta.
- **Capítulo 5. Metodología de fabricación de STF:** Aquí se recogen de forma general los materiales empleados en los STF y los métodos de fabricación, pero centrándose sobre todo en el seguido en este proyecto.
- **Capítulo 6. Caracterización Reológica de los fluidos:** Aquí se detallan las pruebas a las que se ha sometido al STU para determinar sus propiedades y comportamiento. También se incluye cierta información teórica sobre los ensayos.
- **Capítulo 7. Modelos de STU:** Recoge los modelos matemáticos que se han encontrado en la literatura y el desarrollo de los mismos.
- **Capítulo 8. Resultados:** Recoge los resultados de las pruebas llevadas a cabo, así como de los modelos de STU.
- **Capítulo 9. Conclusiones:** Recoge las conclusiones obtenidas una vez se ha completado el desarrollo experimental.
- **Capítulo 10. Marco Socio-Económico:** Se realiza un pequeño estudio de las implicaciones de este proyecto y un presupuesto de la realización del mismo.
- **Anexo A. Glosario:** Recoge definiciones de conceptos complejos que se desarrollan a lo largo del trabajo.
- **Anexo B. Características de los materiales utilizados:** Recoge las características del polipropilenglicol y de la sílice pirógena empleados.
- **Anexo C. Características y planos del STU:** Recoge información sobre el STU, así como los planos y las dimensiones.

---

*Capítulo 2*  
***Marco Regulator***

---

## Capítulo 2. Marco Regulatorio

Los Dispositivos de transmisión de choque (STU), se encuentran sujetos a la Directiva de Productos de Construcción (89/106/CEE), siempre y cuando se empleen en edificios y obras de ingeniería civil.

Existe una norma europea, la UNE-EN 15129:2009 Dispositivos antisísmicos [3], de tipo A, a la que se encuentran sometidos los STU, y cuyo cumplimiento conduce a la obtención del marcado CE (Certificado de conformidad de la UE); por cumplir directamente la Directiva de Productos de Construcción. Dicha norma considera los STU como una variante de los Dispositivos de Unión Rígida.

En la Figura 2.1 se muestra la etiqueta de marcado de conformidad CE para un STU, donde se recoge el fabricante, el tipo de dispositivo, especificaciones técnicas y la conformidad con la norma.


 01234	
<b>Cualquier Cía S.A.</b>  09  01234-CPD-00234	
<b>EN 15129</b>  <b>Dispositivos de unión rígida</b>	
<b>Resistencia a las cargas sísmicas</b>	<b>3 000 kN</b>
<b>Capacidad de rotación</b>	<b>± 0,035 rad</b>
<b>Capacidad de distorsión horizontal</b>	<b>± 200 mm</b>
<b>Durabilidad</b>	<b>conforme</b>

Figura 2.1: Marcado de conformidad de un Dispositivo de unión rígida [3]

Dado que la norma es muy extensa y completa, solo se abordarán algunos aspectos de la misma, tal y como se explica en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Aspectos de la norma europea tratados en este documento

Apartado de la norma UNE-EN 15129:2009		Apartado de este documento en el que se trata
1	OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	No se tratan
2	NORMAS PARA CONSULTA	
3	TÉRMINOS, DEFINICIONES, SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	1.3. Marco Regulador
4	REGLAS GENERALES DE CÁLCULO	3.3. Parámetros de diseño
5	DISPOSITIVOS DE UNIÓN RÍGIDA	
5.3	Dispositivos de unión temporal (dinámica)	
5.3.1	<i>Requisitos funcionales</i>	3.3. Parámetros de diseño
5.3.2	<i>Propiedades de los materiales</i>	3.2. Elementos del STU
5.3.3	<i>Requisitos de diseño conceptual</i>	3.3. Parámetros de diseño
5.3.4	<i>Ensayos de tipo</i>	3.5. Pruebas de ensayo
5.3.5	<i>Ensayos de control de producción en fábrica</i>	
6	DISPOSITIVOS DEPENDIENTES DEL DESPLAZAMIENTO	No se tratan
7	DISPOSITIVOS DEPENDIENTES DE LA VELOCIDAD	
8	AISLADORES	
9	COMBINACIONES DE DISPOSITIVOS	
10	EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD	3.5. Pruebas de ensayo
11	INSTALACIÓN	No se tratan
12	INSPECCIÓN EN SERVICIO	
Anexos		
ANEXO B	COMENTARIOS AL CAPÍTULO 4	3.3. Parámetros de diseño
ANEXO C	COMENTARIOS AL CAPÍTULO 5	3.5. Pruebas de ensayo

Además, existe una norma americana, las especificaciones estadounidenses sobre construcción de puentes de la AASTHO<sup>1</sup> [4], que resulta interesante porque es más restrictiva que la europea. De esta norma se extraerá información relativa a las pruebas de ensayo fundamentalmente.

## 2.1. Notación

La norma europea establece que los dispositivos STU deben de indicarse con el símbolo mostrado en la Figura 2.2 cuando se representen en un plano [3].

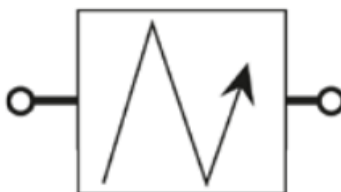


Figura 2.2: Vista en alzado y planta de un STU [3]

<sup>1</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials



---

*Capítulo 3*  
*Dispositivos de*  
*Transmisión de Choque*  
*(STU)*

---



### Capítulo 3. Dispositivos de Transmisión de Choque (STU)

Los dispositivos de transmisión de choque o STU (por sus siglas en inglés, Shock Transmission Unit), son elementos mecánicos para la unión de componentes estructurales. Un ejemplo de estos dispositivos puede verse en la Figura 3.1.



**Figura 3.1: STU instalados en un puente [5]**

Estos dispositivos posibilitan una unión mixta entre lo que se entiende por unión elástica y por unión rígida, en función de las solicitaciones [5]:

- A. Bajo la acción de cargas lentas (condiciones normales de servicio): se comporta como una deslizadera (símbolo A de la Figura 3.2), permitiendo el movimiento relativo de un elemento con respecto al otro.
- B. Bajo la acción de cargas bruscas: se comporta como un empotramiento (símbolo B de la Figura 3.2).



**Figura 3.2: Representación de una deslizadora (izquierda) y un empotramiento (derecha)**

La ventaja de hacer esto es muy simple, permitir ciertos movimientos (como las dilataciones y contracciones térmicas) reduce los esfuerzos en la estructura; pero cuando aparece una carga repentina (como por ejemplo un terremoto), resulta más apropiado que la estructura soporte un mayor esfuerzo a que se produzcan grandes desplazamientos.

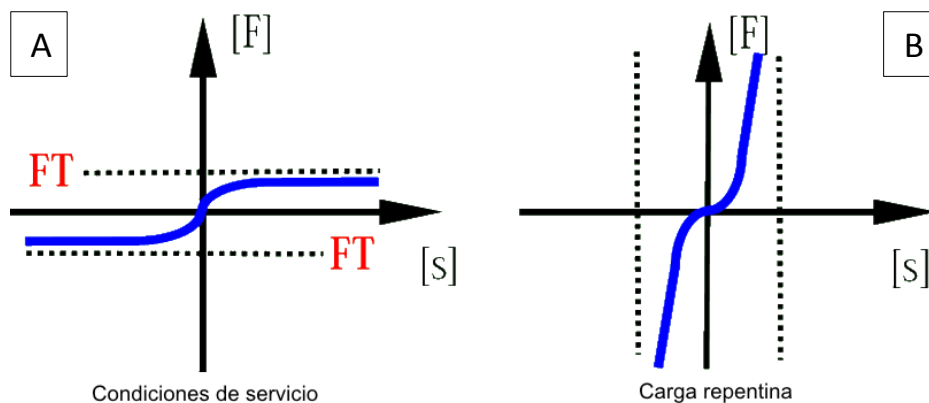
Por otro lado, estos dispositivos reciben diferentes nomenclaturas en función del fabricante, pero todos son el mismo dispositivo. El motivo por el que se les denomina STU es porque estas siglas no están registradas por ninguna marca, aunque originariamente fueron conocidos como LUD. A continuación se listan diferentes denominaciones equivalentes encontradas en la literatura [2,3]:

- STU: Shock Transmission Unit (Dispositivo de transmisión de choque)
- LUD®: Lock-Up Device (Dispositivo de Bloqueo)
- DCD: Displacement-Control device (Dispositivo de control de desplazamiento)
- RCD: Rigid Connection Devices (Dispositivo de unión rígida)
- Seismic Connectors (Conectores sísmicos)
- Dynamic Conector (Conector Dinámico)
- TCD: dispositivos de unión temporal.

### 3.1. Funcionamiento

Los dispositivos STU se basan en el empleo de un fluido no newtoniano (ver Capítulo 4), al que se le hace pasar por un pequeño orificio; de forma que su viscosidad aumenta cuanto mayor sea la velocidad a la que atraviesa ese orificio. Por este motivo, a medida que aumenta la velocidad también aumenta en el dispositivo la fuerza de reacción ( $F$ ). Esto da lugar a dos situaciones extremas:

- Quando la velocidad del fluido es muy lenta (condiciones de servicio), apenas se observa fuerza de reacción alguna. En general, estas velocidades no suelen exceder los 0,01 mm/s, y los desplazamientos asociados a ellos son inapreciables a simple vista [3]. Ver el supuesto A de la Figura 3.3.
- Quando la velocidad del fluido es muy grande (ante un evento repentino y brusco) también lo es la fuerza de reacción, lo que provoca el bloqueo del dispositivo formando una unión rígida. Ver el supuesto B de la Figura 3.3.



**Figura 3.3: Curvas de fuerza (reacción) frente al tiempo en condiciones de servicio (Izquierda) y en caso de carga repentina (Derecha) [6]**

Antes de alcanzarse la situación B, la fuerza de reacción aumenta de forma exponencial con la velocidad, pero este aumento es muy brusco por lo que con un pequeño aumento de a velocidad ya se alcanza el supuesto B. Los modelos matemáticos que representan la evolución de la fuerza de reacción con respecto a la velocidad se describen en el Capítulo 7.

Por tanto, la situación B comienza cuando se alcanza lo que se denomina como velocidad de activación [3], aquella que es lo suficientemente alta como para que el dispositivo se bloquee. No obstante, cuando la velocidad vuelve a disminuir, el dispositivo STU vuelve a su estado normal, permitiendo de nuevo los desplazamientos a baja velocidad que debe soportar en condiciones de servicio [2].

Cabe hacer algunas aclaraciones acerca de los STU [7]:

- No son amortiguadores: no absorben ni disipan energía. Es cierto que existe cierto rozamiento que provoca pérdidas en forma de calor, pero eso es una consecuencia inevitable, no buscada.
- No son resortes: no almacenan energía. Cuando la carga cesa, un dispositivo STU no tiende a recuperar su posición anterior, siendo necesario instalar elementos auxiliares para que esto ocurra.
- Su funcionamiento es igual en ambos sentidos, mientras que los amortiguadores solo absorben la energía al ser comprimidos. En un STU no tiene sentido hablar de compresión, ya que solo existe un pistón que se desplaza de un lado a otro, como se explica en el apartado 3.2.

Para entender esto véase como ejemplo la dilatación y contracción térmica: cuando el elemento conectado se dilata mueve el pistón en una dirección; y cuando se comprime, en la contraria. Por tanto, existe una posición del pistón para cada temperatura, sin que exista almacenamiento de energía potencial en ningún caso. Además, la resistencia al movimiento es igual tanto en el caso de la dilatación como en el de la contracción.

### 3.2. Elementos del STU

En la actualidad, los dispositivos STU son muy simples y compactos, con una única parte móvil, el vástago. El cilindro queda dividido en dos estancias por el pistón del vástago, que, a su vez; contiene los orificios por los que el fluido pasa de una cavidad a otra [2]. En la Figura 3.4 y en la Figura 3.5 pueden verse las diferentes partes que componen el STU, siendo la primera más detallada pero la segunda más visual.

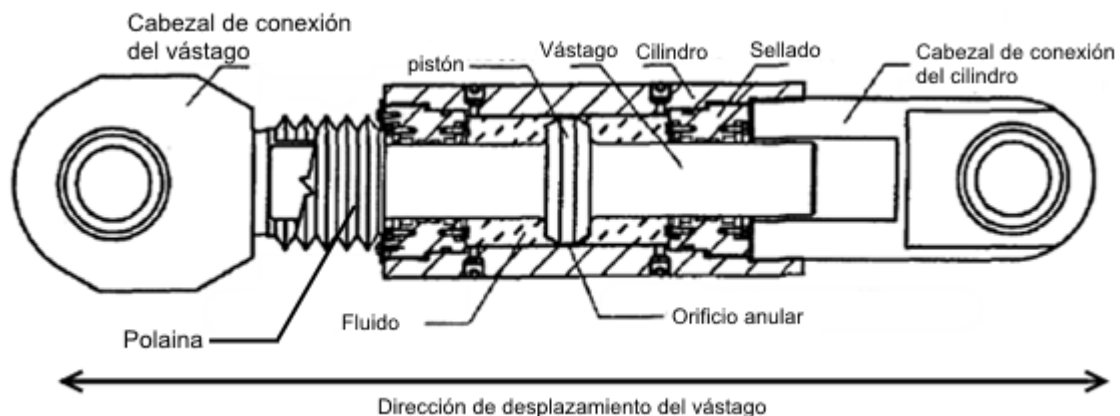


Figura 3.4: Esquema de un sistema STU [6]

Para su fabricación se deben de emplear materiales según las siguientes normas: EN 10025, EN 10083, EN 10088, ISO 3755 o ISO 1083. Si se desean emplear otro tipo de materiales es necesario recurrir a un procedimiento EOTA<sup>2</sup> [3].

A continuación se detallan las diferentes partes de las que se componen estos aparatos, así como los materiales a emplear en cada una de ellas [2].

<sup>2</sup> European Organization for Technical Assessment

### **3.2.1. Cilindro**

Su función es contener en su interior el fluido y están fabricados a partir de tubos de acero continuos, sin soldar, para evitar que surjan fisuras y; por tanto, fallo por fatiga. Deben estar preparados para soportar al menos 1,5 veces la presión que tendría el fluido en las condiciones de máxima carga. Hay que considerar las condiciones ambientales a la hora de escoger el material, pudiendo optarse por diferentes soluciones anti-corrosión:

- Tratamiento superficial
- Pintura
- Acero inoxidable (situaciones más extremas)

### **3.2.2. Vástago**

Elemento móvil del dispositivo que se desliza dentro del cilindro, es bastante fino y se encuentra sometido a un fuerte esfuerzo de compresión proveniente del pistón. Este pistón se encuentra en una posición intermedia de la barra que conforma el vástago.

Para su fabricación suelen emplearse aceros inoxidables de alta resistencia, aunque su precio sea más elevado, dado que la presencia de herrumbre puede provocar un fallo en el sellado. Cuando se emplean ciertos tipos de sellado más endeble, es necesario cromar la barra para garantizar la estanqueidad.

### **3.2.3. Pistón**

El pistón es donde el STU proporciona la fuerza de reacción. Se encuentra en una posición intermedia de la barra que conforma el vástago pero en realidad no es una parte distinta desde un punto de vista estructural, pues él vástago se fabrica monopieza. En algunos casos puede estar perforado, dependiendo del tipo de orificio que tenga el STU.

### **3.2.4. Orificios**

Son los responsables de controlar el flujo del fluido presente en el interior del cilindro. Pueden ser perforaciones microscópicas en el pistón (su área es aproximadamente un millón de veces inferior al área del pistón) o simplemente una holgura entre el pistón y la pared de la carcasa, como en el caso del dispositivo de este proyecto.

### **3.2.5. Sellado**

En estos dispositivos resulta especialmente importante lograr una buena estanqueidad, no solo desde el punto de vista del rendimiento del dispositivo; sino también del mantenimiento, del que puede prescindirse si no se produce ninguna fuga. Por supuesto también es importante que el propio sellado sea resistente al paso del tiempo.

El sellado debe garantizar que no se producen fugas a baja presión (condiciones habituales) pero al mismo tiempo soportar la alta presión que se produce con cargas súbitas. Por eso, los fabricantes han optado por desarrollar sus propios sellados, asegurándose además de que son adecuados para retener el fluido interior.

### **3.2.6. Cabezales de fijación**

Como puede apreciarse en la Figura 3.4, existen dos cabezales que conectan con cada uno de los elementos que se desean unir mediante el STU, uno para el vástago y otro para el cilindro. Estos cabezales se conectan respectivamente con el vástago y el cilindro mediante cojinetes esféricos como los de la Figura 3.4 o simples clavijas como los de la Figura 3.5.

Los cojinetes esféricos permiten desplazamientos de rotación en dos ejes, lo cual sirve para asegurar el correcto alineamiento del vástago con la dirección de movimiento que se desea permitir. Para la fabricación de los cojinetes se emplean diferentes materiales en función de las necesidades: acero inoxidable, acero plateado o acero con recubrimiento polimérico. Las clavijas presentan la ventaja de que resultan más baratas de fabricar y son más simples de calcular.

### **3.2.7. Polaina**

Una polaina es un manguito flexible protector que se emplea para cubrir un elemento móvil o junta. En este caso sirve para evitar la deposición de suciedad sobre la junta del vástago con su correspondiente cabezal.

La junta aquí empleada suele ser de tipo Cardan para permitir cierto movimiento en la dirección perpendicular al papel según la Figura 3.4 y garantizar así el correcto alineamiento.

### **3.2.8. Fluido de trabajo**

Los fluidos más comúnmente empleados son masilla o aceite, ambos ni inflamables ni tóxicos y químicamente inertes. La composición exacta del fluido es diferente en cada fabricante, y estos son muy celosos de mantenerla en secreto.

Cabe destacar que en los STU quedó descartado el empleo de fluidos electrorreológicos (varían sus propiedades con un campo eléctrico) y magnetorreológicos (varían sus propiedades con un campo magnético), ya que estos precisan de una fuente de alimentación externa continuamente [7].

Por el contrario, se ha demostrado que los fluidos a base de silicona se adaptan muy bien a las necesidades de los STU, por lo que son ampliamente utilizados. En caso de querer utilizar un fluido con otra composición, se han de acreditar las propiedades anteriores.

El uso de fluidos a base de hidrocarburos está permitido en casos excepcionales por la norma europea, cuando se requiera que el fluido tenga efecto lubricante. Esto se da en dispositivos muy grandes o en aquellos en los que la frecuencia de los movimientos estructurales pueda provocar un desgaste severo en las juntas de estanquidad [3].

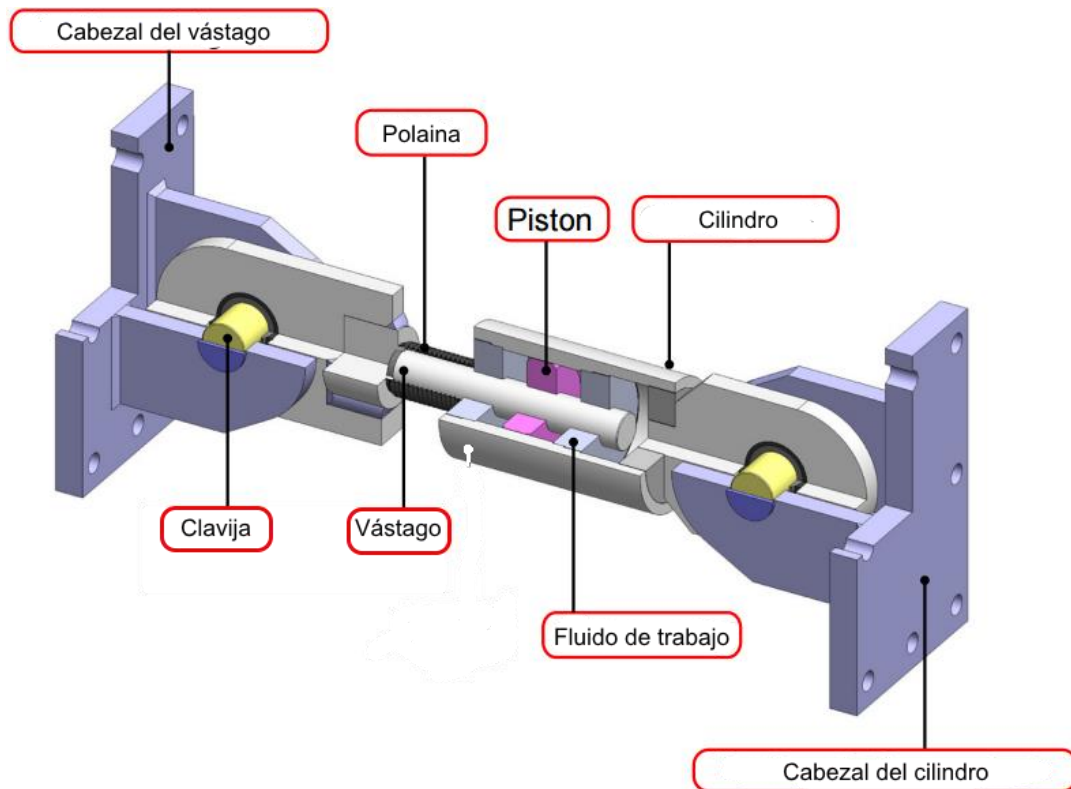


Figura 3.5: Vista en corte tridimensional de un STU [8]

### 3.3. Parámetros de diseño

#### 3.3.1. Determinación del dispositivo

##### 3.3.1.1. Parámetros característicos

De acuerdo con la norma americana, en un proyecto en el que se empleen STU, se deben especificar los siguientes parámetros [4]:

- El número total de STU a utilizar (agrupados en base a su carrera y fuerza de reacción)
- La masa de cada dispositivo
- El rango de temperaturas previsto
- La carrera máxima de cada STU
- La fuerza de reacción máxima que provocara un cierto cambio de temperatura sobre el STU (nótese que esta no es la máxima)
- La carga máxima
- Los materiales empleados tanto en los STU como en los dispositivos auxiliares
- Los tratamientos anti-corrosión necesarios

La norma europea, en cambio, establece que un STU está completamente determinado cuando el ingeniero del proyecto estructural ha especificado estas magnitudes de cálculo [3]:

- La fuerza de cálculo (carga máxima) (kN)
- La velocidad de activación (bloqueo) (mm/s)

- La resistencia máxima a movimientos lentos (kN)
- La capacidad de movimiento lento especificada (mm/s)
- La carrera máxima ( $\pm$  mm): tener en cuenta que existe un desplazamiento en un sentido ( $d_+$ ) y en el contrario ( $d_-$ )
- La carrera térmica ( $\pm$  mm)
- Las tolerancias
- Ángulo de rotación ( $\pm$  grados)
- Rango de temperaturas de servicio

La carrera máxima engloba tanto desplazamientos causados por fenómenos lentos (efectos térmicos, de fluencia y de retracción) como por fenómenos dinámicos, así como la longitud de ajuste adicional si es necesario. De esta manera se asegura que la fuerza que entrega el STU a velocidad menor o igual a la activación sea, al menos, del mismo valor que la carga máxima para cualquier temperatura del rango previsto.

Por otro lado, la velocidad de activación debe tener un valor de aproximadamente el 1% de la velocidad relativa máxima que se estime en los extremos del STU. Así, cuando al STU se le apliquen movimientos relativos lentos en sus extremos (como las dilataciones y contracciones térmicas), la fuerza de reacción que proporcione no será mayor a la resistencia máxima de cálculo. De esta forma se evitan posibles fallos por fatiga en el dispositivo.

#### 3.3.1.2. Documentación

La norma americana establece que se elaboren los siguientes documentos durante la realización del proyecto [4]:

- Planos detallados en los que se aprecien con claridad todas las dimensiones, tanto de los STU como de dispositivos auxiliares
- Planos de instalación de los STU indicando claramente las tolerancias, así como la secuencia de montaje
- Detalles de anclaje de los dispositivos auxiliares
- Una memoria que recoja todos los cálculos llevados a cabo
- Cuestiones administrativas, no se entrará en detalle pues no es una norma de aplicación en España

Por otro lado, la norma europea establece que en la documentación se deben incluir los siguientes aspectos, quedando bajo responsabilidad del proyectista decidir que documentos debe proporcionar él mismo y cuáles deben ser pedidos al fabricante [3].

- Tipo de dispositivo (en este caso STU)
- Prestaciones
- Rango de temperaturas de servicio
- Detalles, dimensiones y tolerancias de cara a la instalación de los dispositivos y sus uniones a la estructura, haciendo referencia a la norma europea
- Las verificaciones de cálculo y los resultados de los ensayos de tipo realizados
- Todos los aspectos de especial relevancia de cara a la instalación de los STU y su ubicación en la estructura

- Una descripción detallada de todos los procedimientos de inspección y de mantenimiento
- Descripción de los procedimientos de sustitución del dispositivo

### **3.3.2. Requisitos de diseño**

La norma europea es la que recoge más ampliamente el proceso de cálculo y diseño de estos dispositivos, recogiendo a continuación los aspectos más relevantes [3].

#### *3.3.2.1. Requisitos fundamentales*

Tanto los STU como los dispositivos auxiliares deben calcularse para satisfacer los siguientes requisitos:

1. No rotura: El dispositivo (y en general cada elemento de la estructura de la que forma parte) no sufrirá daños como consecuencia de las acciones sísmicas contempladas en la Norma EN 1998-1 (edificios) o en la Norma EN 1998-2 (puentes).
2. Limitación de daños: El dispositivo debe resistir una acción sísmica cuya probabilidad de ocurrencia sea superior a la acción sísmica de cálculo (como se recoge en el apartado 2.1 de Norma EN 1998-1), sin que este se dañe hasta el punto de no poder ser utilizado, y cuyos costes de reparación o sustitución fueran desproporcionadamente elevados en comparación con los costes de la propia estructura. Para cargas no sísmicas se debe recurrir a los Eurocódigos.

#### *3.3.2.2. Requisitos funcionales*

Tanto los STU como sus uniones a la estructura donde se instalen deben ser diseñados y fabricados de forma que funcionen en base a los requisitos de cálculo y sus tolerancias a lo largo de todo su ciclo de vida previsto.

Además, durante la fase de diseño, se debe tener en cuenta la accesibilidad del personal de mantenimiento y de las herramientas que sean necesarias para el correcto mantenimiento de la instalación durante su vida útil.

#### *3.3.2.3. Requisitos estructurales y mecánicos*

Tanto los STU como sus uniones a la estructura donde se instalen deben ser diseñados y fabricados de forma que su funcionamiento sea conforme con los requisitos calculados, en base a:

- a) Requisitos ELU (Estado Límite Último): Los STU (y uniones) deben ser verificados a ELU con un coeficiente de seguridad adecuado, comprobándose que la resistencia y la ductilidad son correctas para soportar los efectos de las acciones previstas.  
Si bien en ELU los dispositivos pueden sufrir daños, estos no pueden ser lo bastante graves como para que pongan en riesgo la integridad de la estructura. En este caso, los dispositivos deben poder ser sustituidos sin que sea necesario recurrir a intervenciones mayores.  
Además deben conservar, en la medida de lo posible, una capacidad residual de al menos las acciones permanentes. Estas acciones incluyen las



combinaciones de acciones en condiciones de servicio, así como posibles acciones sísmicas sucesivas definidas previamente.

- b) Requisitos ELS (Estado Límite de Servicio): Los STU no deben sufrir daños en condiciones de servicio de acuerdo con lo descrito en el apartado 3.3.2.1.

### **3.3.3. Requisitos de cálculo**

Como regla general, la norma europea establece que los dispositivos STU serán calculados con un coeficiente de sobre-resistencia ( $\gamma_{Rd}$ ) de valor 1,1, así como un factor de confiabilidad ( $\gamma_x$ ) de 1,5 o 1,1 en el caso de disponer de sistema de protección contra las sobrecargas. A continuación se detallan más consideraciones de cálculo recogidas por la norma [3].

#### *3.3.3.1. Determinación de las propiedades*

A la hora de determinar las propiedades de un dispositivo STU se ha de atender a lo siguiente:

- a) Se debe considerar el historial de soporte de carga y los ciclos de deformación acumulados.
- b) Las propiedades deben ser adecuadamente evaluadas, para poder representar correctamente su comportamiento en las condiciones de deformación y velocidad de cizalla que puedan surgir durante la acción sísmica prevista.
- c) Se deben considerar los fenómenos de envejecimiento que puedan surgir a lo largo del ciclo de vida del STU.

Las propiedades de cálculo (DP) se obtienen durante los ensayos de tipo (ver apartado 3.5, estableciendo de forma correcta los siguientes grupos de propiedades:

- Propiedades de cálculo del límite superior (UBDP): Correspondientes con el valor representativo máximo en las condiciones en las que son obtenidos los valores más altos de las propiedades.
- Propiedades de cálculo del límite inferior (LBDP): Correspondientes con el valor representativo mínimo en las condiciones en las que son obtenidos los valores más reducidos de las propiedades.

Los valores de las propiedades del dispositivo deben encontrarse siempre ubicados entre ambos límites. Para la determinación de los mismos, deben asumirse valores cuasi estacionarios para las acciones variables, con excepción de la temperatura, para la que se asumirá su valor más habitual. Además, los factores de la combinación de acciones se deben tener en cuenta en las combinaciones de acciones sísmicas.

#### *3.3.3.2. Consideraciones ambientales*

Se deben considerar las condiciones ambientales (físicas, biológicas, químicas y nucleares) que soportará el STU durante su vida útil para la determinación de sus propiedades; prestando especial atención a los efectos de la temperatura [3]. Para evitar problemas asociados a estos factores pueden usarse tanto revestimientos como tratamientos térmicos.

La norma americana recoge ciertas condiciones ambientales adversas que pueden ser de referencia [4]:

- Costero (presencia de sal)
- Industrial
- Zona potencialmente inundable
- Zonas expuestas al barro y el hielo
- Nidos de aves
- Exposición a luz ultravioleta y ozono

### **3.4. Ciclo de vida y mantenimiento**

Los sistemas STU modernos son altamente duraderos y tienen bajos costes de mantenimiento. La vida media oscila normalmente entre los 50 y los 75 años, influenciada por los siguientes factores [8]:

- La propia durabilidad del sellado
- La degradación del fluido de trabajo
- La resistencia a fatiga de los componentes
- La corrosión

Esto implica que se deben de llevar a cabo ensayos en función del tiempo de vida requerido. Según la norma americana, este tiempo debe de fijarse en el proyecto y puede oscilar entre 25 y 75 años [4]. El detalle de los ensayos puede verse en el apartado 3.5.

Por otro lado, los dispositivos STU, han demostrado una gran capacidad de adaptación a diferentes rangos de temperaturas. En este sentido, se han llegado a constatar rangos de operación con una amplitud de hasta 130 K, sin que sus propiedades se vean alteradas [9].

#### **3.4.1. Mantenimiento**

Los dispositivos STU carecen teóricamente de mantenimiento, ya que todo el sistema hidráulico se encuentra dentro del dispositivo sin que haya partes externas que puedan ser revisadas [2].

No obstante, la norma europea establece que se debe establecer un programa de inspección y de mantenimiento periódico, al inicio del proyecto, con el fin de asegurar la seguridad y el correcto funcionamiento [3]. Los fabricantes a menudo recomiendan prestar atención a lo siguiente [5]:

- Partes expuestas a la corrosión, reemplazándolas en caso de que fuera necesario. Sobre todo hay que prestar atención a las situaciones descritas en el apartado 3.3.1. y efectuar operaciones de limpieza bien con cepillo o bien con agua a presión.
- Revisar la correcta lubricación de los elementos en contacto (rodamientos, vástago, enganches...).
- Revisión de la presión interna del dispositivo.

Además, también resulta recomendable revisar el dispositivo después de un evento importante (después de que se haya bloqueado) pues es en ese momento es más probable que surjan problemas.

### 3.5. Pruebas de ensayo

Los ensayos de dispositivos STU pueden realizarse en base a las dos normas que se indicaron en el Capítulo 2. Ambas normas recogen las mismas pruebas, pero se centran en aspectos diferentes de los dispositivos.

El objetivo de estas pruebas no es una únicamente ensayar los dispositivos para comprobar su calidad, sino también establecer las leyes de comportamiento de los mismos en las primeras etapas del desarrollo del producto.

La norma americana establece tres tipos de ensayos diferentes [4]:

- **Ensayos de Precalificación:** destinados a evaluar el rendimiento y propiedades de los STU en condiciones generales, no para un proyecto específico. En ellos se ensayan tanto los dispositivos ya ensamblados como sus componentes. Esta norma simplemente establece que se realicen siguiendo las Directrices HICTEC<sup>3</sup>.
- **Ensayos de prototipos:** destinados a evaluar el comportamiento del dispositivo en las condiciones específicas del proyecto, adecuando factores como la temperatura o la humedad relativa. Esta norma exige que los ensayos sean llevados a cabo por un laboratorio independiente y bajo la supervisión de un ingeniero.
- **Control de calidad (CPF<sup>4</sup>):** Se deben llevar a cabo sobre cada unidad que vaya a instalarse y se deben realizar también en un laboratorio independiente.

Por otro lado, la norma europea solo diferencia dos tipos de ensayos, equivalentes a los de precalificación y calidad (prescindiendo de los ensayos de prototipos), como se ve a continuación [3]:

- **Ensayos de tipo:** destinados a evaluar STU completos en condiciones generales (no de proyecto), previamente a su comercialización. Han de hacerse siempre que el STU, con respecto a uno ya existente:
  - Varía su capacidad de carga más de un 20%
  - Su carrera sea un 20% más larga
  - Su diseño conceptual y/o los materiales empleados no sean exactamente iguales

Debe medirse la temperatura del dispositivo en dos direcciones críticas (establecidas por el fabricante), desde 5 minutos antes de que comience la prueba hasta 15 minutos después de que esta concluya.

El objetivo de estos ensayos es demostrar conformidad con esta norma europea, y por tanto con la directiva correspondiente. En caso de demostrarla confiere directamente el marcado CE.

---

<sup>3</sup> Highway Innovative Technology Center

<sup>4</sup> Control de producción en fábrica

- **Control de calidad (CPF<sup>4</sup>):** equivalentes a los de la norma americana, se realizan sobre una pieza de cada lote de producción, estando un lote compuesto como máximo por veinte unidades. Como excepción, el ensayo de presión (se verá más adelante) se realiza a todas las unidades. Esta norma establece que estos ensayos se llevarán a cabo entre 20 y 26 °C.

Además la norma europea establece los siguientes requisitos:

- Existe, en general, una tolerancia de  $\pm 20\%$  durante los CPF<sup>4</sup>.
- La variación de la temperatura se ha de establecer en base a la Norma EN 1990, en el caso de que el dispositivo sea antisísmico.

En la Tabla 3.1 se muestran los ensayos que se listarán a continuación (según la nomenclatura europea, que está en castellano), indicando a que familia pertenecen. Los ensayos de precalificación de la norma americana no se especifican en la tabla.

**Tabla 3.1: Pruebas de ensayo de los STU [3,4]**

Familia	Ensayo							
	Estanqueidad	Presión	Baja velocidad	Alta velocidad	Carga impulsiva	Carga cíclica	Sobrecarga	Fatiga
Ensayos de prototipo (AASHTO)		●	●	●	●		●	●
Ensayos de tipo (UNE)	●	●	●		●	●	●	
CPF <sup>4</sup>		●	●	●	●			

### 3.5.1. Ensayo de Estanqueidad

Tiene como propósito verificar que el sellado puede soportar los movimientos causados por la temperatura (dilatación y contracción) a lo largo del ciclo de vida previsto sin fugas del fluido de trabajo. Este ensayo ha de realizarse justo antes de los ensayos de carga impulsiva y de carga cíclica (el orden de estos dos no importa) por motivos de seguridad [3].

El ensayo consiste en someter al dispositivo a 10.000 ciclos con un desplazamiento igual al máximo que este previsto por efecto de la temperatura. La norma permite derivar el fluido por otro sitio que no sea el orificio por el que pasaría habitualmente con el fin de evitar que el dispositivo se bloquee y poder hacer la prueba más deprisa.

Esta prueba no está recogida en la norma americana, si bien es cierto que esta hace especial hincapié en comprobar la correcta estanqueidad del dispositivo ensayado en todas las pruebas [4].

### 3.5.2. Ensayo de Presión

Se trata de una prueba en la que el dispositivo es sometido a una fuerte presión en el interior del cilindro. Para superar la prueba ha de constatarse que no existe fuga del fluido de trabajo.

En función de la norma la prueba es más o menos exigente:

- Norma americana: Se aplica una presión de 1,5 veces la carga máxima y se mantiene durante 3 minutos. La presión debe ser medida antes y después de realizar la prueba, sin que esta pueda reducirse más de un 5% tras la prueba (en tal caso no se supera) [4].
- Norma europea: Se aplica una presión de 1,25 veces la carga máxima y se mantiene durante dos minutos. Además ha de comprobarse que el dispositivo no ha sido dañado [3].

### 3.5.3. Ensayo a baja velocidad

Con esta prueba se pretende comprobar que el dispositivo no se bloqueará ante sollicitaciones lentas (cargas térmicas generalmente). Ambas normas coinciden en que durante la realización del ensayo han de registrarse y graficarse la secuencia de aplicación de carga (fuerza axial frente al tiempo) y el desplazamiento en función del tiempo [3,4].

Existen tres maneras de llevar a cabo esta prueba, una según la norma americana y dos según la norma europea.

#### 3.5.3.1. Prueba AASHTO

El STU es sometido a tres ciclos continuos de trabajo a la “velocidad de activación” (hasta la cual no ha de bloquearse) y hasta la carrera máxima del vástago. Durante el proceso se debe graficar una curva que represente la carga aplicada frente al desplazamiento. La carga necesaria para realizar los ciclos no debe exceder el 10% de la carga máxima nominal [4].

La Figura 3.6 muestra ejemplos de curvas obtenidas durante un ensayo de un STU según la norma americana.

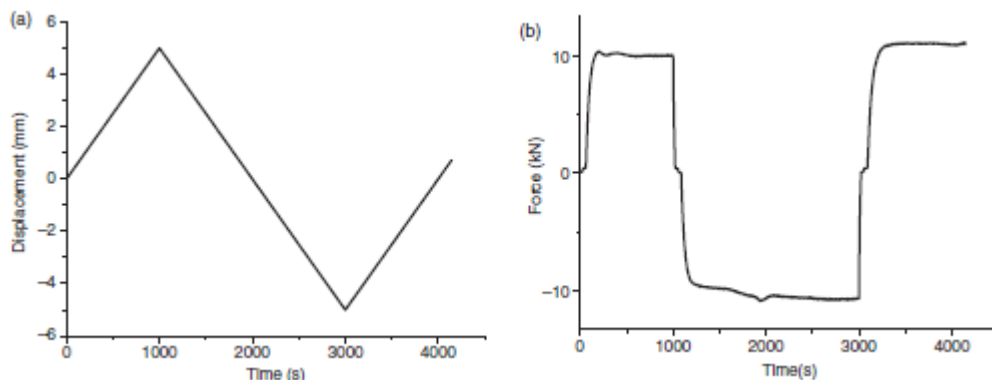


Figura 3.6: Curvas de desplazamiento (a) y fuerza de reacción (b) frente al tiempo en un ensayo a baja velocidad según AASHTO [10]

### 3.5.3.2. Variante I de la norma UNE-EN

Debe someterse al dispositivo a la siguiente secuencia, a una velocidad inferior a 0,1 mm/s [3]:

1. Partiendo de la posición 0 o de equilibrio, se lleva el vástago hasta su posición de máxima carrera en un sentido ( $d_+$ ).
2. A continuación se lleva el vástago hasta su posición de máxima carrera por el otro lado ( $d_-$ ).
3. Se devuelve a la posición 0.

Para superar la prueba, la reacción producida por el STU debe ser en todo momento inferior al 10% de la carga máxima [3].

### 3.5.3.3. Variante II de la norma UNE-EN

Debe someterse al dispositivo a la misma secuencia que la descrita en el apartado 3.5.3.2, solo que aplicando una fuerza constante igual al 10% de la carga máxima, en lugar de una velocidad concreta [3].

Para superar la prueba, ha de satisfacerse la siguiente expresión [3]:

$$v = 2 \cdot \frac{|d_+| + |d_-|}{T} < 0,01 \text{ mm/s} \quad (3.1)$$

Dónde:

- $v$  : Velocidad media de desplazamiento del vástago [mm/s]
- $d_+$  : Desplazamiento máximo hacia la izquierda [mm]
- $d_-$  : Desplazamiento máximo hacia la derecha [mm]
- $T$  : Tiempo [s]

### 3.5.4. Ensayo de alta velocidad

El objetivo de esta prueba es comprobar que el STU se bloquea ante desplazamientos bruscos y repentinos. Precisamente por esto en este ensayo no se realizan ciclos, ya que el dispositivo debe bloquearse (si todo va bien).

Durante esta prueba, se somete al dispositivo fuerzas equivalentes a la carga máxima aplicadas a alta velocidad (determinada por el proyecto). El ensayo se realiza con cargas tanto a tracción como a compresión. Al igual que en el ensayo lento, se debe graficar una curva que represente el desplazamiento frente a la carga aplicada.

Para superar la prueba el dispositivo debe bloquearse antes de que el vástago se desplace más de 12 mm; además, la rigidez del dispositivo no debe variar más de un 10% desde el momento del bloqueo hasta que alcanza la carga máxima [4].

La Figura 3.7 muestra ejemplos de curvas obtenidas durante un ensayo de un STU según la norma americana.

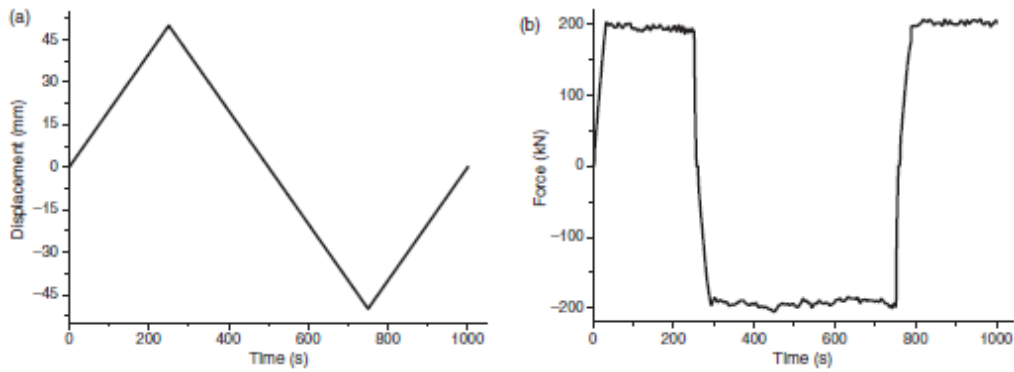


Figura 3.7: Curvas de desplazamiento (a) y fuerza de reacción (b) frente al tiempo en un ensayo a alta velocidad según AASHTO [10]

### 3.5.5. Ensayo de carga impulsiva o simulación dinámica

El objetivo de esta prueba es comprobar que el dispositivo se bloquea correctamente cuando se aplica una sacudida importante.

#### 3.5.5.1. Prueba AASHTO

Se somete al STU a la siguiente secuencia [4]:

1. Se aplica una carga al dispositivo, pudiendo pasar como máximo 0,5 segundos entre que se comienza a aplicar la carga y se alcanza el valor máximo.
2. Se mantiene la carga máxima durante 5 segundos, sin fluctuaciones.
3. Se invierte la carga (se aplica la misma pero en sentido contrario), pudiendo pasar como máximo 1 segundo desde que se empieza a variar la carga hasta que se alcanza el valor deseado.
4. Se mantiene esta otra carga durante 5 segundos.

A diferencia de otras secuencias casi iguales descritas por la norma europea, la carga que se debe aplicar aquí debe ser de al menos 3 veces la carga de bloqueo (que se determina en el ensayo de alta velocidad), pero siempre inferior a la carga máxima. Esto implica que, si el resultado de multiplicar por 3 la carga de bloqueo es superior a la carga máxima nominal, el dispositivo no es apto.

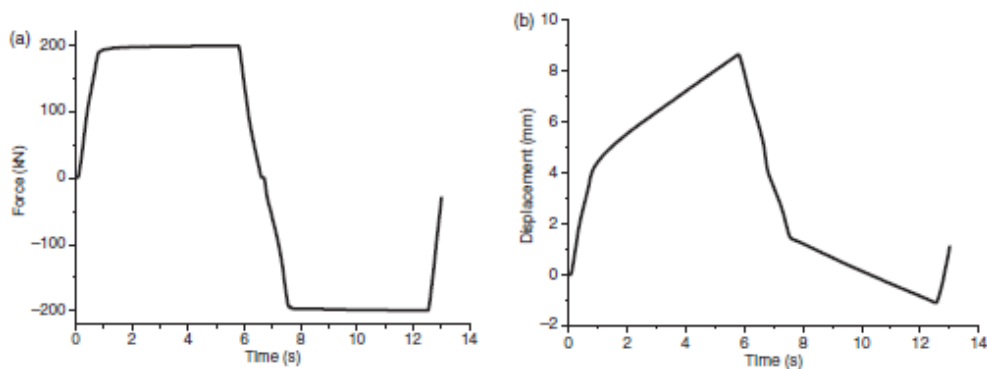


Figura 3.8: Curvas de fuerza de reacción (a) y desplazamiento (b) frente al tiempo en un ensayo de simulación dinámica según AASHTO [10]

Para superar la prueba el dispositivo no podrá desplazarse más de 12 mm entre el punto de carga nula y el de carga máxima. Tampoco se deberá superar durante el proceso de aplicación de la carga [4].

La Figura 3.8 muestra ejemplos de curvas obtenidas durante un ensayo de un STU según la norma americana.

### 3.5.5.2. Prueba UNE-EN

Debe someterse al dispositivo a la siguiente secuencia [3]:

1. Se aplica la carga máxima al dispositivo, pudiendo pasar como máximo 0,5 segundos entre que se comienza a aplicar la carga y se alcanza el valor máximo.
2. Se mantiene la carga máxima durante 5 segundos, sin fluctuaciones.
3. Se invierte la carga (se aplica la misma pero en sentido contrario), pudiendo pasar como máximo 1 segundo desde que se empieza a variar la carga hasta que se alcanza el valor deseado.
4. Se mantiene esta otra carga durante 5 segundos.

Para superar la prueba ha de cumplirse que:

- a) Tras la etapa 1, el desplazamiento no puede ser mayor que el valor correspondiente con él de la carga máxima.
- b) Tras la inversión de la carga, la deflexión total no debe ser superior al doble del valor de la deflexión de cálculo.
- c) Durante los periodos en los que la carga se mantiene constante, la velocidad no debe superar la velocidad de activación.

La Figura 3.9 muestra una curva típica de fuerza frente al tiempo que se obtiene según el ensayo UNE, y la Figura 3.10 la de desplazamiento frente al tiempo. Como puede observarse, ambas tienen la misma forma que las equivalentes de la prueba AASHTO que se ven en la Figura 3.8.

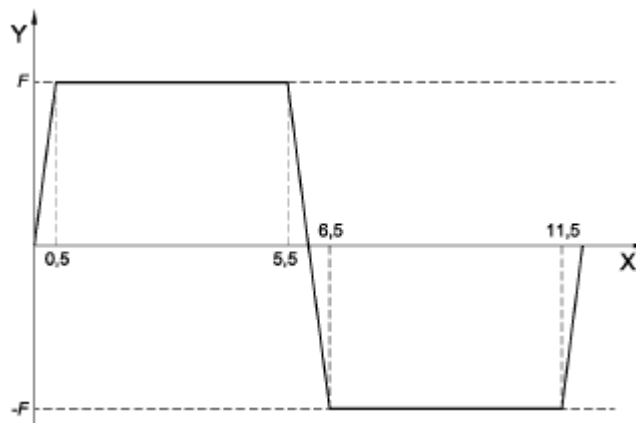


Figura 3.9: Curvas de fuerza (Y) frente al tiempo (X) en un ensayo a alta velocidad según UNE [3]



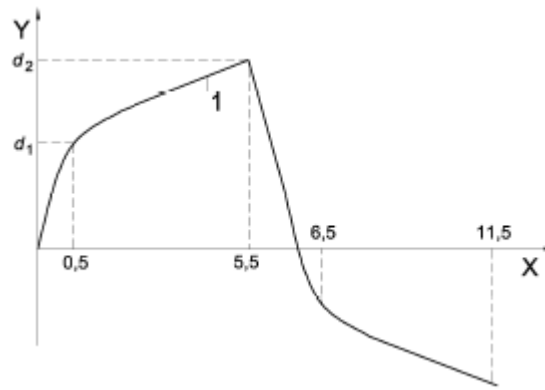


Figura 3.10: Curvas de desplazamiento (Y) frente al tiempo (X) en un ensayo a alta velocidad según UNE [3]

### 3.5.6. Ensayo de carga cíclica

Esta prueba se realiza con el fin de comprobar el comportamiento del STU bajo la acción sistemática de la carga de cálculo [3].

El ensayo debe durar al menos 15 segundos, pero si se cree que estos ciclos pueden durar más en condiciones de servicio, debe prolongarse la prueba. Durante el ensayo se aplica un número de ciclos de fuerza sinusoidal según la siguiente ecuación [3]:

$$F(t) = F_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t) \quad (3.2)$$

Dónde:

- $F(t)$ : Fuerza a aplicar durante el ensayo [N]
- $F_0$ : Fuerza de referencia establecida por el ingeniero [N]
- $f_0$ : Frecuencia establecida por el ingeniero [Hz]
- $t$ : Tiempo [s]

Para superar la prueba ha de cumplirse que:

- a) La deflexión del STU bajo la carga máxima no es superior al valor previsto.
- b) No se aprecian daños ni fugas en el dispositivo.

### 3.5.7. Ensayo de sobrecarga

Esta prueba tiene por objeto comprobar la capacidad de resistencia de carga de un STU. Ambas normas establecen como requisitos para superar la prueba la ausencia de fugas de fluido y de daños en el dispositivo.

#### 3.5.7.1. Prueba AASHTO

Se aplica al dispositivo una fuerza equivalente a 1,5 veces la carga nominal a una velocidad lo bastante rápida como para que se bloquee. La carga se mantiene durante 30 s [4].

#### 3.5.7.2. Prueba UNE-EN

Debe someterse al dispositivo a la siguiente secuencia [3]:

1. Se aplica 1,5 veces la carga máxima al dispositivo, pudiendo pasar como máximo 0,5 segundos entre que se comienza a aplicar la carga y se alcanza el valor máximo.
2. Se mantiene la carga máxima durante 5 segundos, sin fluctuaciones.
3. Se invierte la carga (se aplica la misma pero en sentido contrario), pudiendo pasar como máximo 1 segundo desde que se empieza a variar la carga hasta que se alcanza el valor deseado.
4. Se mantiene esta otra carga durante 5 segundos.

Aunque la secuencia es prácticamente idéntica que la descrita en el apartado 3.5.5., nótese que en este caso la carga aplicada es 1,5 veces la nominal, no la nominal.

#### **3.5.8. Ensayo de fatiga**

Se realizan en función de las exigencias del proyecto en el que se vayan a emplear STU. El ensayo puede realizarse siguiendo las Directrices HITEC<sup>3</sup>, que consiste en someter al dispositivo a 100.000 ciclos de tensión y compresión a plena carga.

Durante la prueba se comprueba la integridad estructural de los elementos que componen el STU [4].

### **3.6. Aplicaciones actuales**

Un dispositivo STU permite llevar una carga de un lugar a otro, esto posibilita tres tipos de actuaciones [2]:

- Repartir la carga: Cuando se produce el bloqueo del dispositivo, este pasa a conectar dos partes de la estructura que antes no lo estaban. Esto hace que se transmita fuerza por esa unión, liberando fuerza de otras. Básicamente es como añadir un grado de hiperestatismo a la estructura. Se verá más claro cuando se vea el ejemplo de aplicación en puentes.
- Reducir la carga: La instalación de dispositivos STU puede reducir cargas y esfuerzos en la estructura como consecuencia del propio reparto de los mismos.
- Transferir la carga: Mediante los STU se puede lograr desviar las fuerzas hacia secciones de la estructura que resulten más apropiadas.

A continuación se detallan las aplicaciones más habituales en las que se emplean STU. En todas ellas se recurre a un conjunto de las tres actuaciones listadas anteriormente.

#### **3.6.1. Dispositivo anti-sísmico en puentes**

La Figura 3.11 muestra la estructura estándar de un puente soportado por cinco pilares, donde se aprecia que la unión entre el viaducto y los pilares difiere en cada junta. Mientras que en el pilar central es de tipo “empotramiento” (impide todos los movimientos), en los otros cuatro pilares es de tipo deslizadera (permite movimientos en la dirección horizontal).

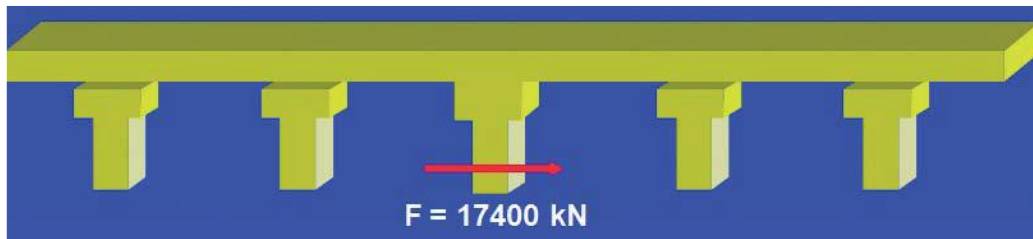


Figura 3.11: Puente convencional sometido a un esfuerzo longitudinal [11]

Si sucediera un fenómeno sísmico, u otro tipo de cargas horizontales (como por ejemplo el frenado de emergencia de un tren), el pilar central tendría que absorber toda la carga.

La Figura 3.12 muestra el mismo puente, pero ahora con un dispositivo STU en las uniones de los pilares laterales. Cuando se produce un evento brusco, el dispositivo se bloquea, transformando las deslizaderas en empotramientos; y repartiendo la carga horizontal entre los cinco pilares [11].

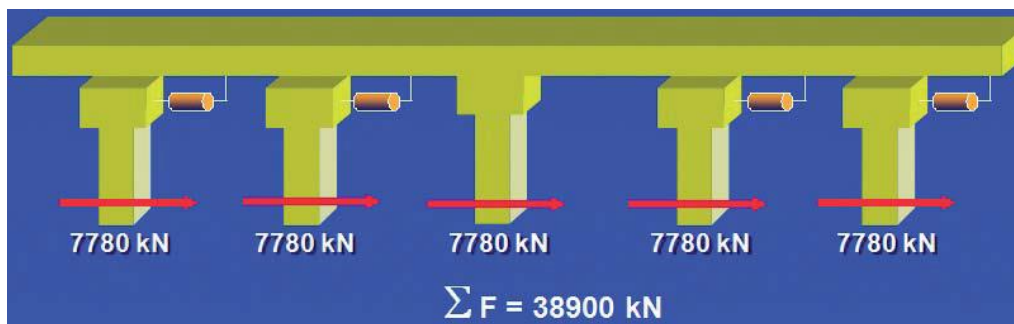


Figura 3.12: Puente con STU sometido a un esfuerzo longitudinal [11]

Comparando la Figura 3.11 con la Figura 3.12 se observa que la carga total a la que se somete al puente ha aumentado a más del doble cuando se instalan los STU. Esto puede aprovecharse de dos maneras:

- Aumentar la capacidad del puente [11].
- Emplear un pilar central más pequeño para ahorrar en costes de construcción [2].

### 3.6.2. Dispositivo anti-sísmico en edificios

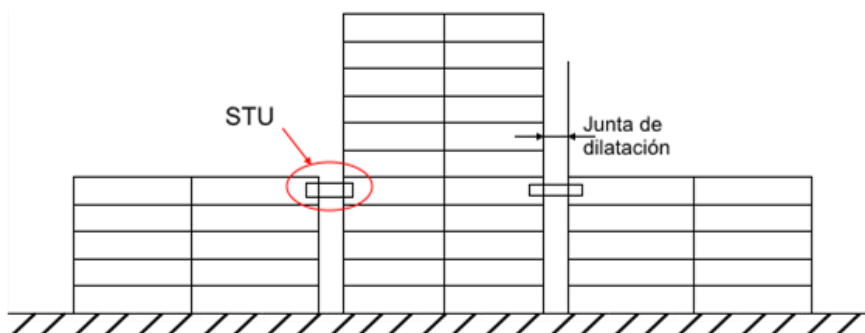
Los STU se han empleado en diversos tipos de edificios, como se ve a continuación [2].

#### 3.6.2.1. Aparcamientos de varias plantas

Estos aparcamientos se componen normalmente de varias estructuras individuales iguales (cada una es una planta del edificio), que se apilan unas sobre otras. A menudo, la capacidad de la fachada para absorber esfuerzo cortante no es suficiente para resistir las fuerzas que se producen en un terremoto, pero esta capacidad puede ser aumentada colocando un dispositivo STU en las juntas de dilatación que conectan cada planta.

### 3.6.2.2. Edificios de planta variable

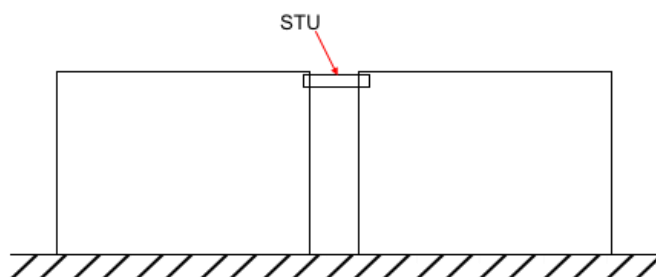
En edificios de base ancha con diferentes secciones a alturas diferentes, es necesario instalar juntas de dilatación para permitir la deformación debida a efectos térmicos. Sin embargo, se puede instalar un STU entre estas juntas con el fin de unirlos en caso de sismo. Un ejemplo de esto se puede ver en la Figura 3.13.



**Figura 3.13: Edificio de planta variable conectado mediante STU [2]. NOTA: el espacio de la junta de dilatación se ha exagerado en el dibujo**

### 3.6.2.3. Edificios muy próximos

Cuando se tienen edificios elevados situados muy próximos entre sí en una zona con riesgo de terremoto o de tormenta de viento o arena; hay riesgo de que un edificio golpee al otro. Este problema se agrava en aquellos edificios dotados de un sistema de suspensión para sismos, pues pueden pivotar en torno a este anclaje. Una forma de prevenir esto es conectar los edificios a través de un dispositivo STU por la parte superior como se ve en la Figura 3.14.



**Figura 3.14: Dos edificios próximos conectados mediante STU [2]**

### 3.6.2.4. Patrimonio arquitectónico

También se ha planteado el empleo de STU en edificios históricos, con el fin de protegerlos de eventos sísmicos, pero sin inducirles esfuerzos indeseados en condiciones normales.

## 3.1. Derivados del STU

En el mercado existen varios productos que son muy similares a los STU, que básicamente son el amortiguador viscoso (VD) y el amortiguador de resorte pretensado (PSD), aunque algunos fabricantes también tienen productos híbridos.

Cabe destacar que el STU surgió como una evolución del amortiguador viscoso, por tanto, podría considerarse que realmente el STU es un derivado de este último.

### 3.1.1. Amortiguador viscoso (VD)

El amortiguador viscoso o VD (por sus siglas en inglés, Viscous Damper) es un dispositivo, como su propio nombre indica, de amortiguación; es decir, de disipación de energía [2]. Esta es su gran diferencia con el STU, porque desde un punto de vista estructural son bastante parecidos, como puede verse en el VD mostrado en la Figura 3.15.



Figura 3.15: Vista en CAD de un Amortiguador Viscoso [12].

Al igual que los STU, los amortiguadores viscosos presentan una variación en su fuerza de reacción en función de la velocidad de aplicación de la carga. A baja velocidad, se establece un nivel de fuerza de reacción (puede ser nulo); y a partir de una cierta velocidad especificada proporcionan una reacción constante. La evolución de la reacción con la velocidad se rige también por la ecuación 7.1 [13].

La Figura 3.16 muestra un gráfico de reacción frente a la carrera de un amortiguador viscoso, equivalente al del STU de la Figura 7.2.

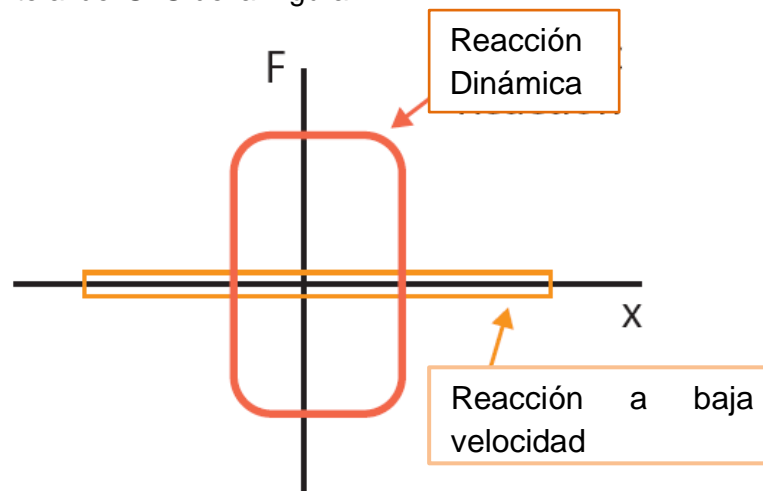


Figura 3.16: Evolución de la Reacción con la carrera en un Amortiguador Viscoso a baja y alta velocidad [11]

Estos dispositivos reducen los esfuerzos estructurales, las vibraciones, y las aceleraciones disipando energía en forma de calor.

Con respecto a su morfología, como ya se ha indicado, es muy similar a un STU. En la Figura 3.17 puede verse una vista en corte de un amortiguador viscoso.

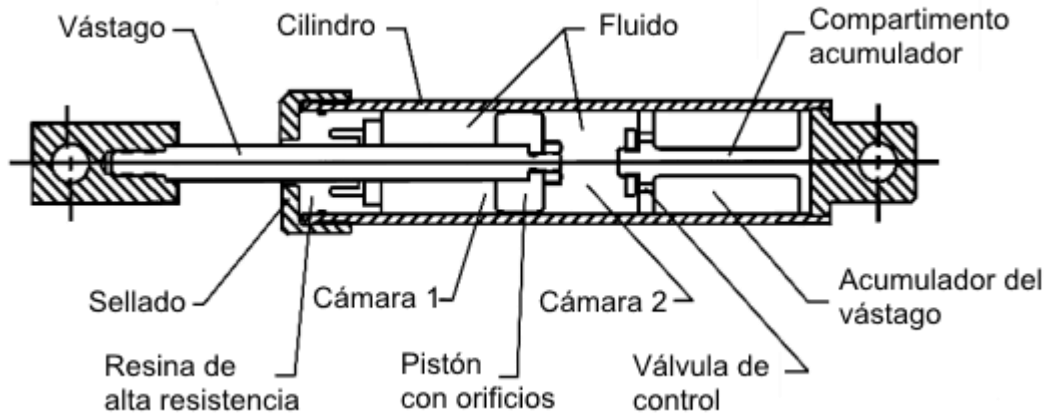


Figura 3.17: Detalle de un Amortiguador Viscoso [11]

La mayoría de las piezas son las mismas que en el STU. Un cilindro que contiene en su interior un fluido viscoso (del mismo tipo que los STU) dividido en dos cámaras por un pistón perforado. Con respecto al sellado, estos dispositivos incorporan una resina para lograr mayor estanqueidad [11].

Lo que sí que es diferente es el “acumulador del vástago”, que es un compartimento relleno de espuma o caucho, o bien un pistón acumulador móvil presurizado. Su función es permitir el desplazamiento volumétrico del vástago cuando este entra o sale del cilindro.

### 3.1.2. Snubbers

Los “snubbers” (en inglés, amortiguador) son dispositivos STU especialmente diseñados para su uso en grandes sistemas de tuberías, como las presentes en centrales nucleares, oleoductos o acueductos. Su objetivo es proteger estas infraestructuras tanto de eventos sísmicos como del efecto de golpe de ariete que se produce al abrir y cerrar válvulas; resultando especialmente importante en el caso de las centrales nucleares [2].

La principal diferencia con un STU “convencional” es el rango de temperaturas al que se ve expuesto, así como a vibraciones, aunque en menor medida. Esto tiene dos consecuencias fundamentales:

- La vida de estos dispositivos es muy inferior a los instalados en puentes, de unos 20 años, ya que tanto el fluido como el sellado se degradan más deprisa.
- Hay que seguir un riguroso programa de mantenimiento (al menos anual), dado que el dispositivo es más complejo. Este hecho cobra especial relevancia cuando hablamos de centrales nucleares.

En la Figura 3.18 puede verse un “snubber”, muy similar a un STU, salvo por el cilindro que se ve en la parte superior.

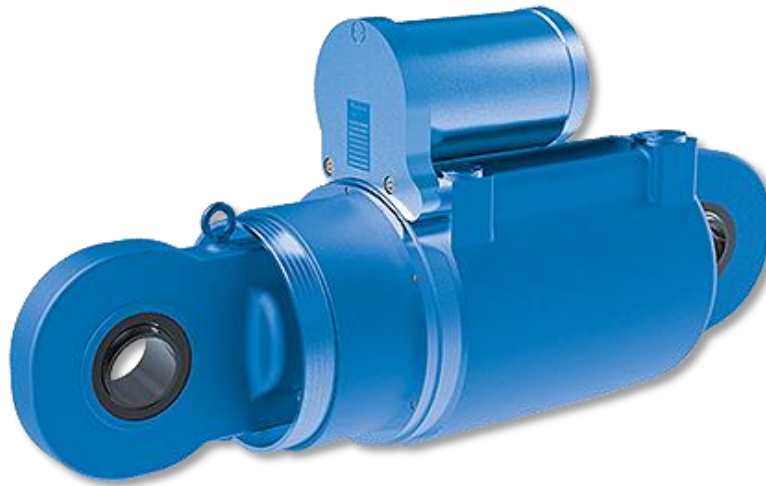


Figura 3.18: Vista de un Snubber [14]

#### 3.1.2.1. Características constructivas

Desde un punto de vista estructural, los “snubbers” son considerablemente más complejos que otros STU, cosa que también influye en las necesidades de mantenimiento. Aparte de todos los componentes propios de un STU, deben incorporar un depósito de fluido hidráulico y válvulas de control, a fin de garantizar un volumen de fluido constante con las variaciones de temperatura [2]. El esquema de un “snubber” puede verse en la Figura 3.19.

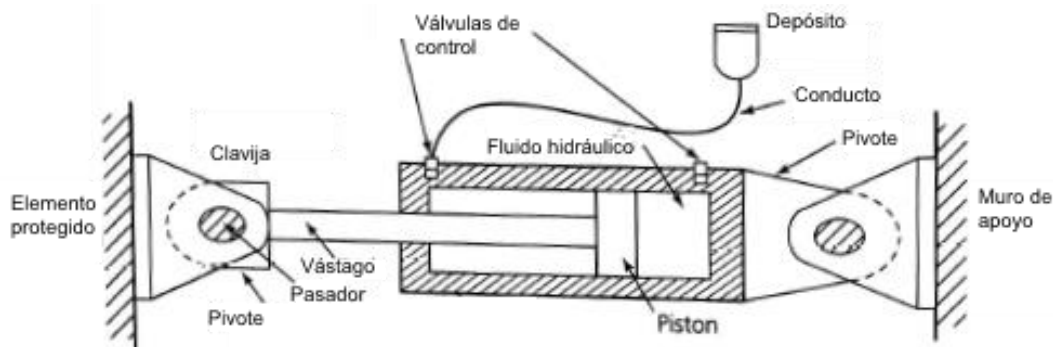


Figura 3.19: Vista esquemática de un “Snubber” [2]

#### 3.1.2.2. Funcionamiento

En condiciones de servicio, el elemento que se desea proteger se mueve con respecto al muro de apoyo con una velocidad relativamente baja, de modo que el pistón empuja al fluido a través de la válvula de control de un lado a otro del cilindro con una baja resistencia [2].

Cuando se produce un fenómeno brusco como los descritos anteriormente la velocidad del pistón es mucho mayor, haciendo que la válvula de control se cierre y se bloquee así el dispositivo. Pero mientras que un STU corriente este bloqueo es total, los “snubbers” disponen de un pequeño orificio de sangrado que permite al dispositivo moverse muy lentamente, con una velocidad denominada “Bleed Speed” (Velocidad

de Sangrado). Este orificio permite además que el dispositivo pueda desbloquearse una vez el evento cese, mediante la acción de las presiones.

Además, el bloqueo de los “snubbers” no se activa hasta que se alcanza una cierta fuerza, denominada Fuerza de Separación (Breakaway). Una vez se ha superado esta barrera, se entra en lo que se denomina etapa de arrastre (Drag) en el que la velocidad va aumentando hasta alcanzar la velocidad de bloqueo (Lock-Up), momento a partir del cual continuará moviéndose con la “Bleed Speed”. El gráfico de funcionamiento característico de un “snubber” puede verse en la Figura 3.20.

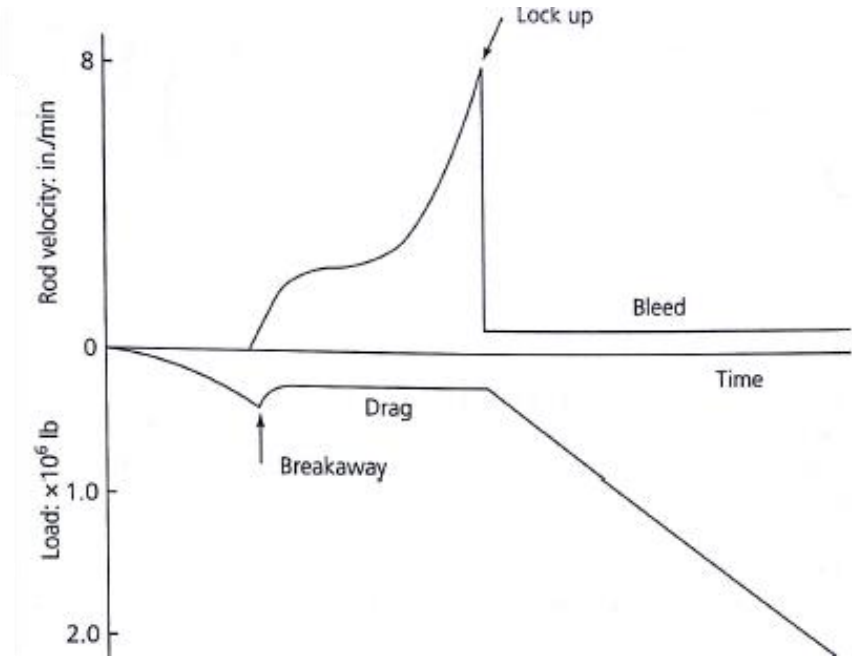


Figura 3.20: Evolución temporal de un evento sísmico (arriba) y fuerza de reacción (abajo) [2]

### 3.1.3. Amortiguadores de Resorte Pretensados (PSD)

Los dispositivos PSD (por sus siglas en inglés, Preloaded Spring Dumpers) son una variante de los STU, cuya principal diferencia es la capacidad de recuperar su posición inicial una vez cesa la excitación. La Figura 3.21 muestra un PSD.

El principio de funcionamiento es el mismo (hacer pasar un fluido dilatante por un pequeño orificio), pero ahora la energía se disipa en forma de calor para evitar que se produzcan desplazamientos antes de que se alcance cierto nivel de fuerza ( $F_0$ ), siendo imposible comprimir el dispositivo. Esta fuerza de precarga varía en función de la temperatura, efecto que deberá ser considerado [12].

Una vez superada esa fuerza umbral, el PSD se comprime. Cuando la fuerza se retira, el dispositivo vuelve a su posición original gracias a la función de muelle que incorpora. La ley de comportamiento está descrita por la siguiente ecuación [11]:

$$F = F_0 + Kx + C \cdot V^\alpha, \quad (3.3)$$



Dónde el término  $C \cdot V^\alpha$  es el mismo que en los STU (ver Capítulo 7); la fuerza de precarga,  $F_0$ , es la definida anteriormente; y el término  $Kx$  se corresponde con el efecto del muelle, siendo  $K$  la constante de rigidez y  $x$  la elongación.



**Figura 3.21: Dispositivo PSD [12]**

Como inconveniente, destacar que estos sistemas funcionan en un único sentido, por tanto, si se desea tener este efecto en dos sentidos, habrá que colocar dos dispositivos [12].

#### **3.1.4. Reston® SA**

Los dispositivos Reston® SA están a medio camino entre un STU y un PSD. Su comportamiento en condiciones de servicio es el mismo, pero cuando se produce un evento brusco, limitan los desplazamientos (no los impiden) y disipan una gran cantidad de energía. La Figura 3.22 muestra un Reston® SA.



**Figura 3.22: Reston® SA [15]**

La energía disipada deja de ser transmitida a la estructura, permitiendo así optimizar el diseño de la misma. Internamente, tienen las mismas partes que un STU, por lo que no se ha entrado en detalle [15].

---

*Capítulo 4*  
*Fluidos Dilatantes*

---

## Capítulo 4. Fluidos Dilatantes

### 4.1. Reología

La Reología es la parte de la física que se encarga del estudio de la deformación de un medio continuo (ya sea sólido, líquido o gaseoso) por efecto de la fluidez. Existen dos tipos de medios continuos ideales que interesan ahora [16]:

- **Sólido elástico o hookeano:** Se deforma elásticamente bajo la acción de una carga, recuperando su estado inicial cuando esta cesa. Existe una energía de deformación que es almacenada en forma de energía potencial elástica.
- **Fluido ideal o newtoniano:** Bajo una carga sufren una deformación irreversible. La energía de deformación se disipa en forma de calor, es decir, el medio fluye.

Cuando se aplica un esfuerzo tangencial sobre un medio, aparece una deformación, que se relaciona con el primero en función de la naturaleza del medio [17], como se ve en la Figura 4.1.

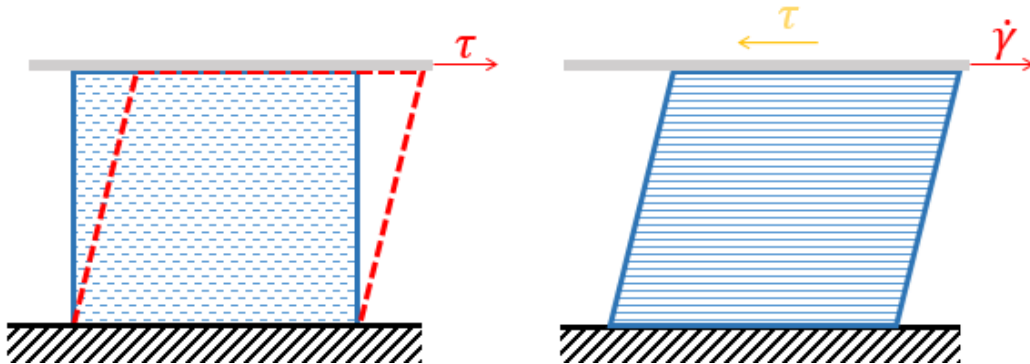


Figura 4.1: Deformación de un sólido elástico (izquierda) y de un fluido ideal (derecha) bajo un esfuerzo de cizallamiento aplicado a través de una placa paralela [16]

Nótese que en el caso del fluido lo que se aplica no es una fuerza, sino una velocidad que induce esa tensión, por la propia fricción interna de sus moléculas. La relación entre esta tensión y la deformación se corresponde con la ecuación 4.1 (Ley de Hooke) en el caso de los sólidos ideales y con la ecuación 4.2 (Ley de Newton) en el caso de los fluidos ideales [16]:

$$\tau = G \cdot \frac{dL}{dy} = G \cdot \tan \gamma = G \cdot \gamma \quad (4.1)$$

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (4.2)$$

Dónde:

- $\tau$ : Esfuerzo cortante [Pa]
- $\gamma$ : Deformación [%]
- $\dot{\gamma}$ : Velocidad de cizalla [ $s^{-1}$ ]
- $G$ : Módulo de cortadura [Pa]

- $\mu$ : Viscosidad dinámica o absoluta [Pa·s]

La viscosidad ( $\mu$ ) es la propiedad física que mide la oposición que un fluido presenta a fluir, y es una forma de medir la fricción interna de un medio.

En la práctica la mayor parte de los materiales presentan un comportamiento mixto entre estos dos modelos ideales.

#### 4.1.1. Tipos de fluidos

Desde un punto de vista reológico, los diferentes medios continuos se clasifican de la siguiente manera según la Figura 4.2 [18]:

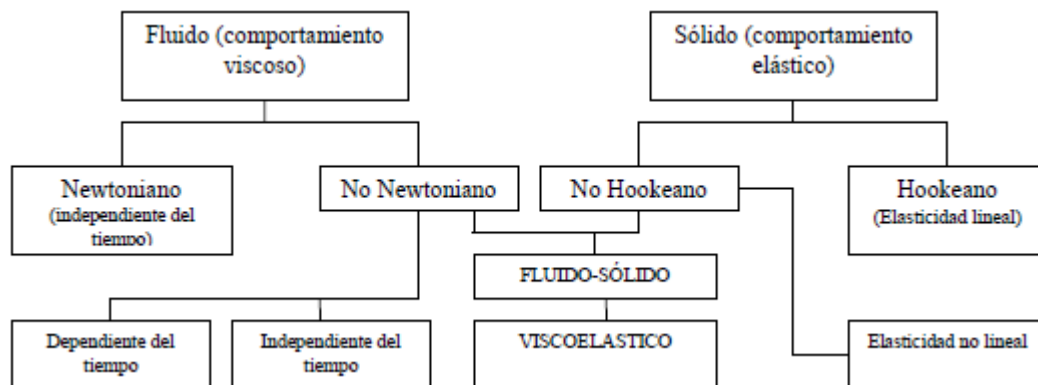


Figura 4.2: Esquema de clasificación de los materiales en función de sus propiedades reológicas [18]

Si se focaliza más en lo que a fluidos se refiere, se observa que estos se clasifican de acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 4.3:

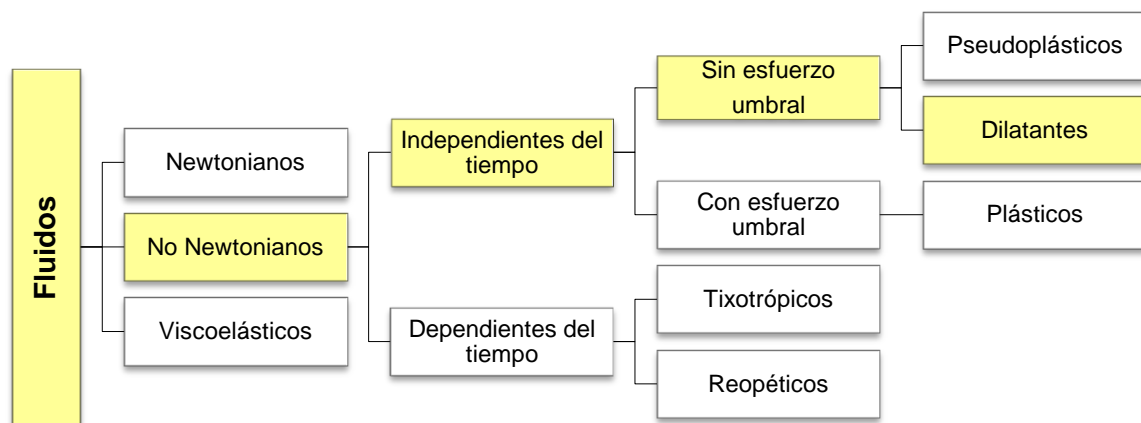


Figura 4.3: Clasificación de los fluidos en base a sus propiedades reológicas [19]

A su vez, como se ve en la Figura 4.3, existen tres categorías de fluidos principales [19]:

- Newtonianos: Se da una relación de proporcionalidad lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla. Se rigen por la ecuación 4.2.

- No newtonianos: No existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla, o bien existe esfuerzo umbral,  $\tau_0$ , a partir del cual el fluido comienza a fluir.
- Viscoelásticos: Presentan un comportamiento y propiedades a medio camino entre líquidos y sólidos.

#### 4.1.2. Viscosidad

En general, existen dos formas de medir la viscosidad (en fluidos newtonianos) [19]:

- Viscosidad dinámica o absoluta ( $\mu$ ): Es el término que aparece en la ecuación 4.2. Sus unidades son Pa·s.
- Viscosidad cinemática ( $\nu$ ): es una relación entre la viscosidad dinámica ( $\mu$ ) y la densidad ( $\rho$ ) del fluido:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} [m^2/s] \quad (4.3)$$

No obstante, en los fluidos no newtonianos existen otras relaciones que pueden resultar interesantes:

- Viscosidad aparente ( $\eta$ ): Cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla para fluidos de comportamiento no lineal. Su ecuación tiene la misma forma que la de Newton (4.2).
- Viscosidad extensional ( $\mu_e$ ): La que presenta un fluido no newtoniano cuando se le aplica un esfuerzo de tracción. Es la relación existente entre dicho esfuerzo y la velocidad de cizalla en su eje de aplicación.

Los factores que afectan a la viscosidad de un fluido ideal son fundamentalmente la temperatura y la presión. Por otro lado, en los fluidos no newtonianos está puede depender también de la velocidad de cizalla o del tiempo. Los fluidos electrorreológicos y magnetorreológicos también dependen del campo eléctrico o magnético [19].

La viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura. La explicación física radica en que a medida que la temperatura aumenta, también lo hace la energía cinética debida a la vibración de las moléculas; llegando a superar las fuerzas viscosas. Existen diferentes modelos matemáticos para determinar esta relación, pero los más comunes son la Ley de Arrhenius (4.4) y la de Poiseuille (4.5) [19]:

$$\mu = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (4.4)$$

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha T + \beta T^2} \quad (4.5)$$

Dónde:

- $\mu$ : viscosidad dinámica [Pa·s]
- $\mu_0$ : viscosidad dinámica a 0 °C [Pa·s]
- $A$  y  $B$ : Constantes propias del líquido
- $\alpha$  y  $\beta$ : Coeficientes térmicos (constantes)

- $T$ : Temperatura, en °C para la 4.5, y en K para la 4.4

Es muy importante mantener la temperatura constante cuando se realiza un ensayo para determinar la viscosidad de un fluido, puesto que la dependencia entre ambas es muy considerable. Esta dependencia de la viscosidad con la temperatura puede estudiarse con lo que se conoce como *índice de viscosidad (I.V.)*, de forma que cuanto más bajo sea este índice, mayor será la dependencia entre ambas variables [19].

Con respecto a la presión, se ha probado que la viscosidad depende exponencialmente de esta; no obstante, estas variaciones son muy pequeñas y despreciables respecto a las que provoca la temperatura [19]. Sin embargo, existen aplicaciones en las que resulta conveniente considerarla, para lo que es necesario hacer uso de la Ley de Barus:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{\left[\frac{AP-B}{T-T_0}\right]} \quad (4.6)$$

Dónde:

- $\mu$ : Viscosidad dinámica [Pa·s]
- $\mu_0$ : Viscosidad dinámica la temperatura de referencia,  $T_0$  [K]
- $A$  y  $B$ : Constantes propias del líquido, con las unidades adecuadas
- $P$ : Presión [Pa]
- $T$ : Temperatura [K]
- $T_0$ : Temperatura de referencia (a la que se ha obtenido  $\mu_0$ ) [K]

#### 4.1.3. Modelos reológicos

Un modelo reológico es una expresión matemática con la que se puede caracterizar el comportamiento reológico de un fluido. La selección de uno u otro modelo depende de los resultados experimentales, pues se seleccionara el que minimice el error cometido [18].

En el caso de los fluidos dilatantes existen tres modelos básicos que pueden ser utilizados [18]:

- Ostwald-de Waele o Ley de la potencia: descrito por la ecuación:

$$\tau = K \cdot (\dot{\gamma})^n \quad (4.7)$$

- Casson: variante simplificada del anterior, descrito por la ecuación:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + K_1 \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (4.8)$$

- Sisko: variante más precisa, descrito por la ecuación:

$$\eta = \eta_{\infty} + K_2 \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (4.9)$$

En las ecuaciones 4.7, 4.8 y 4.9 se distinguen los siguientes términos:

- $\tau$ : Esfuerzo cortante [Pa]
- $K, K_1, K_2$ : Índice de consistencia, es una forma de medir la viscosidad en función del parámetro  $n$  (cada uno de ellos representa una constante obtenida experimentalmente)
- $n$ : Índice de comportamiento de flujo, mide cuanto difiere el comportamiento de un fluido no newtoniano respecto a uno newtoniano
- $\eta$ : Viscosidad aparente [Pa·s]

Si bien todos estos modelos son válidos, el modelo de Cross es el que ofrece una precisión mayor a la hora de determinar el comportamiento de este tipo de fluidos. El modelo original de Cross se basa en la siguiente ecuación [20]:

$$\eta = \eta_{\infty} + \left( \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + \alpha \dot{\gamma}^m} \right) \quad (4.10)$$

Dónde:

- $\eta$ : Viscosidad aparente [Pa·s]
- $\eta_0$ : Viscosidad sin velocidad de cizalla [Pa·s]
- $\eta_{\infty}$ : Viscosidad con velocidad de cizalla infinita [Pa·s]
- $\alpha$  y  $m$ : Constantes propias del fluido
- $\dot{\gamma}$ : Velocidad de cizalla [ $s^{-1}$ ]

Este modelo cumplía las premisas que se había planteado Cross para desarrollar el mismo [20]:

- Ser capaz de obtener una regresión muy precisa a partir de los datos experimentales para una gran variedad de rangos de velocidades de deformación.
- Tener pocas constantes, que estas sean fácilmente evaluables y que posean un significado físico.

En la actualidad, el modelo de Cross ha sido reformulado con la siguiente expresión [20]:

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^n} \quad (4.11)$$

Dónde se han reemplazado los términos  $\alpha$  y  $m$  de la ecuación 4.10 por los términos  $\lambda$  y  $n$  respectivamente, que también son constantes propias del fluido. La ventaja de esta formulación es que así ya no es necesario que  $\dot{\gamma}^n$  sea una función par, ya que tanto  $\lambda$  como  $\dot{\gamma}$  son siempre positivos.

## 4.2. Fluidos Espesantes (STF)

Los fluidos dilatantes o espesantes son habitualmente designados por sus siglas en inglés, STF (Shock Thickening Fluid). Se trata de fluidos no newtonianos, cuya

viscosidad depende de la velocidad de cizalla, siendo el comportamiento que se ve en la Figura 4.4 el modelo ideal de este tipo de fluidos.

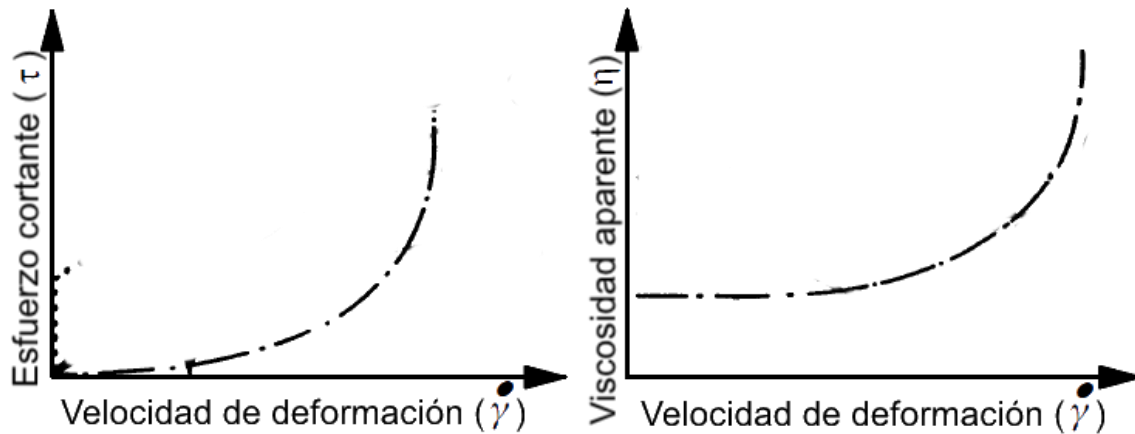


Figura 4.4: Curvas de fluidez (izquierda) y de viscosidad (derecha) en función de la velocidad de cizalla (velocidad de deformación) de un fluido dilatante [16]

En la Figura 4.4 se observa como la viscosidad aumenta de forma exponencial desde un valor inicial a medida que aumenta la velocidad de cizalla hasta un punto en el que la viscosidad es tan alta que se comporta como un sólido. Por otro lado, el esfuerzo cortante también aumenta de forma exponencial con la velocidad de cizalla, pero desde cero [19].

Cabe destacar que este fenómeno es totalmente reversible, pues en el momento en que cesa la carga (o simplemente se reduce la velocidad de cizalla) el material recupera su comportamiento de líquido ideal.

#### 4.2.1. Explicación física

El fenómeno de espesamiento no es muy común (es mucho más frecuente el comportamiento fluidificante), pero dada su relevancia ha sido estudiado con bastante ímpetu. Para poder comprender lo que sucede, hay que tener en cuenta que estos fluidos son suspensiones o coloides, y las dos fases presentes en las mismas (ver Glosario).

Aunque habitualmente se asume que el comportamiento dilatante y espesante son lo mismo, lo cierto es que no tiene por qué. La dilatación (efecto microscópico) está asociada a la aplicación de cierta velocidad de cizalla a las partículas en suspensión de un fluido, debido a que estas tienden a rodearse unas a otras, y al no poder tomar un camino directo aumenta el volumen total. Por otro lado, el espesamiento (efecto macroscópico) es el comportamiento que confiere las propiedades singulares a estos fluidos, independientemente de lo que suceda a nivel microscópico.

Es cierto que en los ensayos llevados a cabo que se citan en la literatura se ha comprobado que, en general, la dilatación y el espesamiento comienzan a la misma velocidad de cizalla. No obstante, también se ha constatado en ciertos fluidos la aparición de comportamiento dilatante sin que se produzca un aumento de la viscosidad. Es por ello que se ha llegado a la conclusión de que el comportamiento dilatante es necesario, pero no suficiente, para que exista espesamiento [21].



Con respecto al comportamiento espesante, que es el que realmente determina el cambio en el comportamiento del fluido, existen dos teorías que explican este comportamiento [22].

#### 4.2.1.1. Teoría de orden y desorden (ODT)

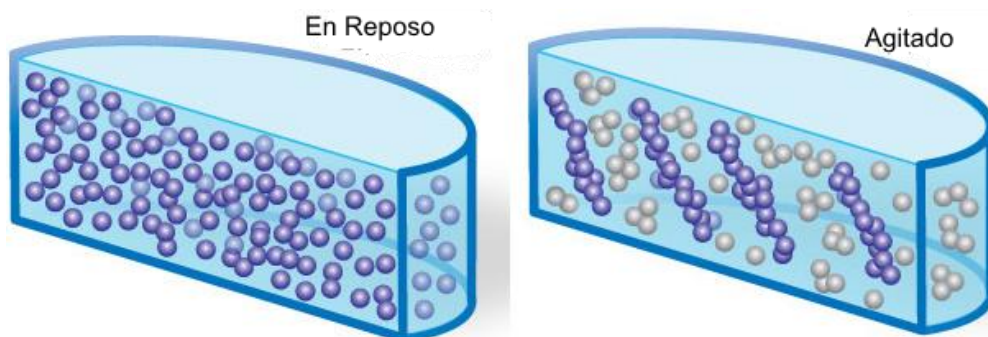
Cuando no se aplica ninguna velocidad de cizalla al fluido (o es muy baja), las partículas se encuentran ordenadas, de forma que las partículas de la fase dispersante apenas tienen huecos por donde moverse. Sin embargo, cuando se aumenta la velocidad, aumenta también el espacio entre las partículas de la fase dispersa, dejando más hueco para que las partículas de la fase continua se metan por los intersticios [18,23].

A esto hay que sumar el efecto de la turbulencia, que aumenta también con la velocidad de cizalla. Esta turbulencia dificulta el movimiento de las partículas del sólido, que al encontrarse entre las partículas del líquido se quedan inmóviles provocando un mayor esfuerzo cortante, que a su vez aumenta la viscosidad.

#### 4.2.1.2. Teoría de agrupación hidroeléctrica

En estado reposo las partículas que componen la mezcla se repelen ligeramente como consecuencia de las fuerzas electrostáticas, de forma que no sedimentan ni tampoco se agrupan [24]. Sin embargo, cuando se aplica un esfuerzo de cizallamiento sobre el fluido, las partículas se empujan entre sí, y para poder separarse deben superar fuerzas de arrastre viscosas que aparecen en los pequeños intersticios de lubricación entre partículas vecinas.

Esto implica la existencia de una velocidad de cizalla mínima, que al excederse provoca que las partículas se adhieran unas a otras momentáneamente, como consecuencia de las fuerzas de lubricación. Se forman así grupos de partículas (hidrocoloides) que se deshacen cuando la carga cesa, como puede verse en la Figura 4.5.



**Figura 4.5:** Partículas de un fluido dilatante en reposo (izquierda) y bajo la aplicación de esfuerzo de cizallamiento (derecha) [24]

Cuando las velocidades de deformación son pequeñas, las partículas presentan movimientos más independientes, pero al agruparse aumentan la viscosidad efectiva de la mezcla. Es precisamente esta velocidad de cizalla mínima la que indica el inicio del proceso de espesamiento del fluido [21].

Se han llevado a cabo numerosos experimentos a fin de determinar la velocidad de cizalla mínima, así como el esfuerzo tangencial asociado a ella. Aun así se ha demostrado que estos valores pueden ser predichos tanto por un modelo como por otro.

#### 4.2.2. Factores que afectan al comportamiento espesante

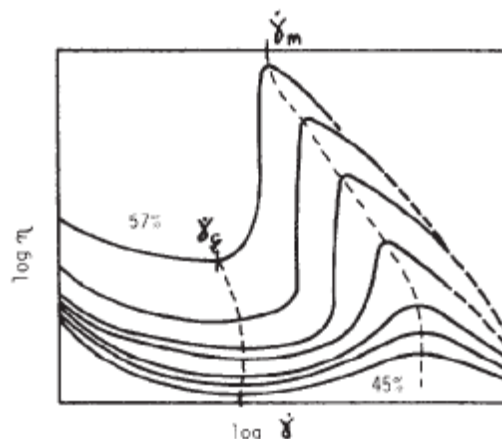
El comportamiento espesante puede ser alterado de por dos vías. La primera es modificar la velocidad de cizalla a partir de la cual se aprecia el fenómeno dilatante (velocidad mínima, designada como  $\dot{\gamma}_c$ ), y la segunda es modificar la relación entre viscosidad y velocidad de cizalla. Para modificar estos aspectos se pueden cambiar los siguientes parámetros de la mezcla [22]:

- Factores propios de la fase dispersa (sólido):
  - Fracción volumétrica del sólido ( $\phi$ )
  - Tamaño de la partícula
  - Forma de la partícula
  - Heterogeneidad de las partículas
  - Interacciones entre partículas
- Factores propios de la fase dispersante (líquido):
  - Viscosidad del líquido

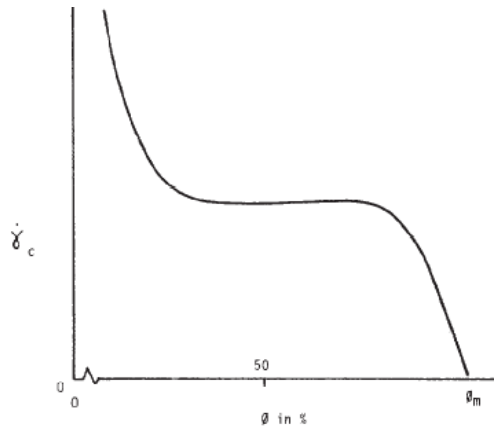
##### 4.2.2.1. Concentración del sólido o grado de empaquetamiento ( $\phi$ )

Es el factor que más afecta al comportamiento espesante y es también el más estudiado. Este valor es la relación entre el volumen que ocupa el sólido en la mezcla frente al de toda la mezcla (sólido y líquido). A medida que aumenta el grado de concentración, también se acentúa el comportamiento espesante, modificándose los dos parámetros descritos anteriormente

- La viscosidad aumenta de forma más pronunciada con la velocidad de cizalla. Ver Figura 4.6.
- La velocidad de cizalla mínima disminuye, pero no de forma lineal, sino como se observa en la Figura 4.7.



**Figura 4.6:** Variación de la curva (en escala logarítmica) viscosidad frente a velocidad de cizalla con el grado de empaquetamiento. Las curvas superiores representan un mayor grado de empaquetamiento [23]



**Figura 4.7: Variación de la velocidad de cizalla mínima con el factor de empaquetamiento (%) [23]**

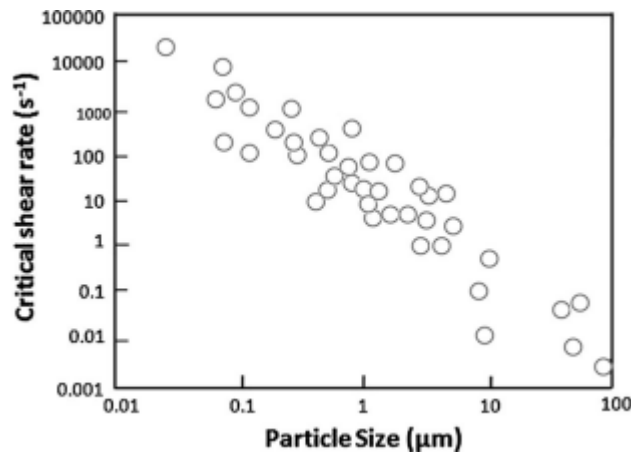
Existe un grado de empaquetamiento crítico a partir del cual el fluido presenta propiedades más próximas a las de un sólido. Este punto se conoce como transición de atascamiento [21].

La explicación de esto es que cuantas más partículas de sólido hay en la mezcla, más cerca estarán unas de otras. De ahí que surjan interacciones entre las partículas, ya que cuando estas están muy próximas, comienzan a modificar los campos magnéticos de las partículas vecinas. Además, un mayor grado de empaquetamiento también conduce a una mayor fricción interna cuando se aplica un esfuerzo cortante.

Tener en cuenta que diferentes concentraciones pueden provocar un cambio en el comportamiento del fluido, es decir, que no varía la velocidad de cizalla mínima, sino que el fluido puede pasar de newtoniano a no newtoniano [17].

#### 4.2.2.2. Tamaño de la partícula

La teoría más comúnmente aceptada es que cuanto mayor es el tamaño de la partícula, menor es la velocidad mínima. La Figura 4.8 muestra el resultado del experimento llevado a cabo por Barnes [25].

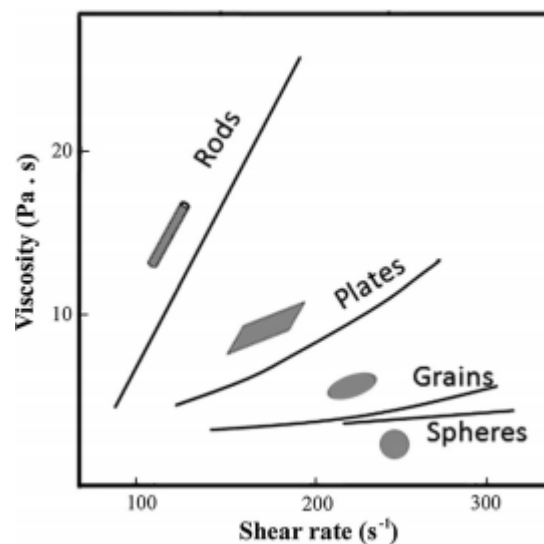


**Figura 4.8: Variación de la velocidad de cizalla mínima con el tamaño de partícula [26]**

#### 4.2.2.3. Forma de la partícula

Se trata de un factor que también tiene una gran influencia en el comportamiento dilatante. Las partículas en forma de varilla son las más apropiadas para lograr el comportamiento espesante, esto se debe a que estas tienden a alinearse en la dirección del flujo y presentan un mayor comportamiento elástico [23].

Por el contrario, las partículas con formas de placa o discoidales son las menos eficaces para conseguir espesamiento por cizalla. Por otro lado, las partículas esféricas tampoco son muy apropiadas ya que disipan menos energía y tienden a aumentar menos la viscosidad. Además, las partículas anisotrópicas conducen a un comportamiento fluidificante con menor grado de empaquetamiento que las partículas esféricas. La Figura 4.9 muestra una comparación de las curvas viscosidad-velocidad para diferentes formas de partícula.



**Figura 4.9:** Diferentes curvas Viscosidad frente a velocidad de cizalla para mezclas con partículas en forma de varilla, placa, granular y esférica [26]

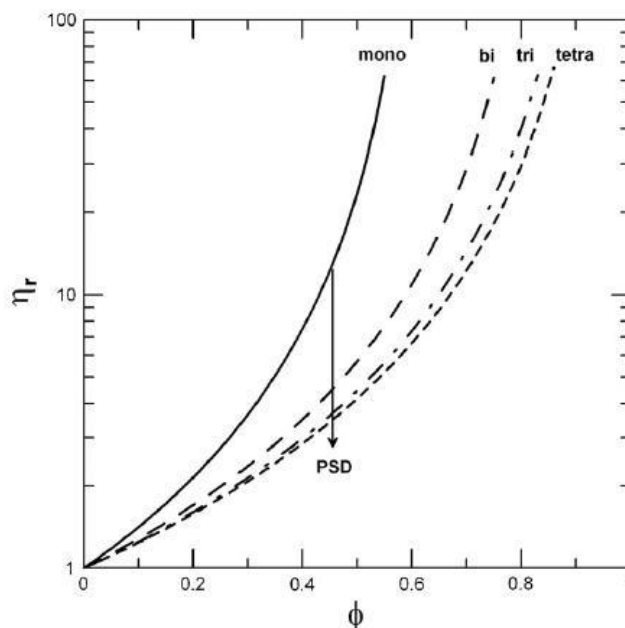
Las partículas con formas alargadas, tienden a formar los conglomerados mucho más deprisa que las que tienen formas esféricas o discoidales. En este sentido, resulta especialmente relevante la relación de aspecto. Se ha demostrado que cuanto mayor es el valor de esta, el espesamiento comienza a producirse a la misma velocidad para menores fracciones volumétricas.

#### 4.2.2.4. Heterogeneidad de las partículas

Este apartado hace referencia a la diferencia entre los tamaños de partícula del sólido. Cabe mencionar que es posible fabricar este tipo de fluidos incluyendo más de un soluto.

Diversos estudios indican que cuanto más diferentes son las partículas, más aumenta la velocidad de cizalla mínima. Dado que las partículas pequeñas pueden meterse entre los intersticios de las partículas más grandes, se genera una especie de efecto lubricante que reduce la viscosidad aparente de la mezcla.

De hecho, diferentes estudios han demostrado que para mezclas con el mismo grado de empaquetamiento, cuantos menos solutos hay, el comportamiento espesante es más notorio; como se ve en la Figura 4.10.



**Figura 4.10: Curvas de Viscosidad Relativa frente al grado de empaquetamiento para mezclas de uno, dos, tres y cuatro solutos respectivamente [23]**

En casos extremos se llega a eliminar el comportamiento dilatante de una suspensión si añaden más partículas diferentes. En cualquier caso, conviene eliminar las partículas de menor tamaño si se pretende mejorar el comportamiento espesante de la mezcla [22].

#### 4.2.2.5. Interacciones entre partículas

En las mezclas espesantes, ha de impedirse la floculación (ver Glosario). Para ello las partículas no deben presentar fuerzas de atracción entre sí, estas pueden ser de repulsión o simplemente inexistentes. Para garantizar esto se puede modificar la superficie de las partículas mediante una descarga eléctrica o mediante repulsión estérica.

#### 4.2.2.6. Viscosidad del líquido

La viscosidad de un STF es linealmente proporcional a la viscosidad de la fase dispersante de la mezcla y es además el parámetro con más peso, aunque también el menos variable (por eso se dice que el más importante es la fracción volumétrica).

Aunque poco, esta viscosidad puede variar como se vio en el apartado 4.1.1. (presión, temperatura, etc.). Aparte de esto, la elección de uno u otro disolvente puede afectar a las interacciones entre las partículas del sólido.

### 4.2.3. Tipos de comportamiento espesante

Existen dos tipos fundamentales de comportamiento espesante [22]:

- Comportamiento espesante continuo (CST): aquellos en los que la viscosidad aumenta de forma gradual.
- Comportamiento espesante discontinuo (DST): aquellos en los que la viscosidad aumenta de forma súbita.

Todos los fluidos presentan comportamiento CST en condiciones normales. No obstante, existen cierto tipo de mezclas en las que se observa un salto brusco en la viscosidad cuando se alcanza cierta concentración de sólido. Cuando esto sucede, el fluido alcanza repentinamente su viscosidad máxima. Este comportamiento debe evitarse en aplicaciones industriales o estructurales, pues puede resultar peligroso.

#### *4.2.3.1. Comportamiento espesante continuo (CST)*

En este tipo de comportamiento, el grado en el que la viscosidad aumenta con la velocidad de cizalla viene impuesto por la concentración de sólido ( $\phi$ ). Normalmente el comportamiento dilatante comienza a aparecer para  $0,3 < \phi < 0,4$ ; sin que se aprecie comportamiento espesante para concentraciones inferiores. Independientemente del grado de empaquetamiento, existe una velocidad de cizalla mínima a la que el comportamiento espesante hace aparición.

Con este tipo de concentraciones el comportamiento dilatante es muy suave, y a medida que esta aumenta, el comportamiento espesante se hace gradualmente más notorio. También se ha observado que el comportamiento espesante comienza con un esfuerzo crítico,  $\tau_0$ , que es independiente del grado de empaquetamiento [21].

#### *4.2.3.2. Comportamiento espesante discontinuo (DST)*

En muchos STF, el aumento de la viscosidad con la velocidad de cizalla continúa aumentando junto con el grado de empaquetamiento, hasta el punto de que la viscosidad y la tensión tangencial parecen saltar discontinuamente a partir de cierta velocidad de cizalla. Por tanto, se suele decir que el fluido evoluciona de un comportamiento continuo a uno discontinuo a medida que aumenta la concentración de sólido.

Se ha constatado que la velocidad de cizalla mínima, no depende del grado de empaquetamiento, al igual que sucedía con CST. También se ha constatado que cuándo el comportamiento es discontinuo, el espesamiento tiene un límite a partir de ciertos valores de esfuerzo cortante, por encima del cuál no sigue espesándose. Este límite tampoco depende del grado de empaquetamiento.

Una propiedad de los fluidos que presentan este comportamiento, es que el salto que se aprecia en las curvas, tanto de tensión tangencial como de viscosidad frente a la velocidad de cizalla; se observa para grados de empaquetamiento ligeramente inferiores al valor crítico.

Otra de las características del comportamiento DST, es que este se da a un rango muy bien definido de velocidades de deformación. La Figura 4.12 muestra cómo cambia la curva de la tensión tangencial con la velocidad de cizalla para diferentes grados de empaquetamiento, y en la Figura 4.11 se puede ver la relación de esa tensión tangencial con la viscosidad, que es la variable de interés.

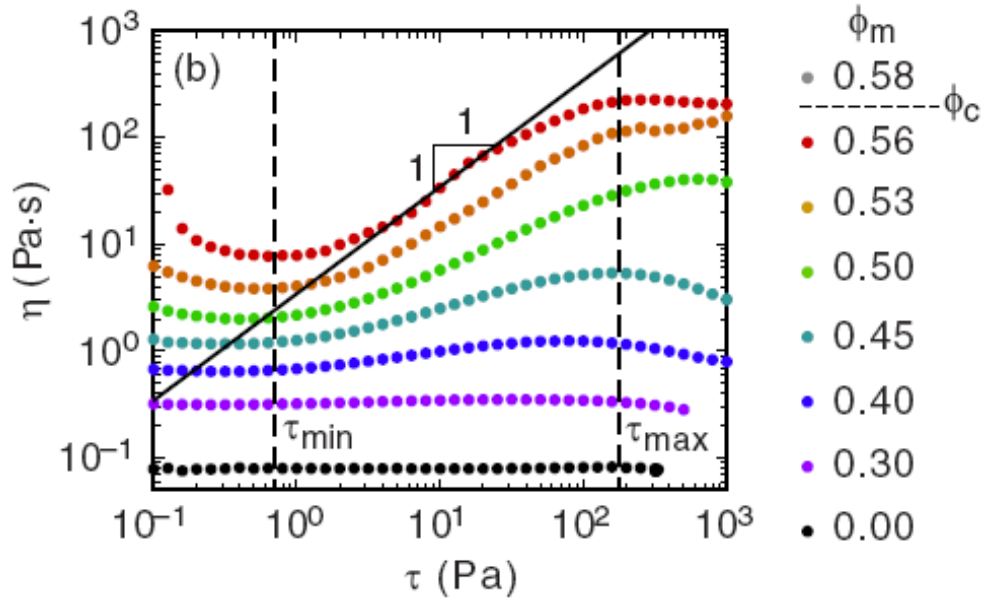


Figura 4.11: Evolución de la viscosidad con el esfuerzo cortante para distintos grados de empaquetamiento [21]

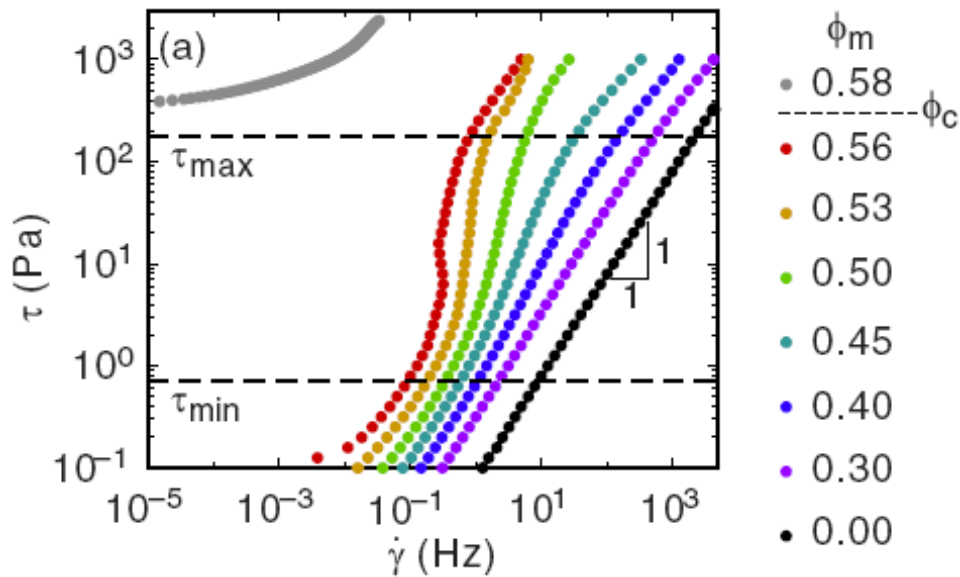


Figura 4.12: Evolución del esfuerzo cortante con la velocidad de cizalla para distintos grados de empaquetamiento [21]

#### 4.2.4. Modelo Reológico Dilatante

En general, el comportamiento dilatante de un fluido no aparece solo, sino que este va acompañado de comportamiento fluidificante. Este comportamiento es precisamente el contrario al dilatante, el fluido se vuelve menos viscoso con la velocidad de cizalla [27].

El comportamiento fluidificante puede darse o no, tanto antes como después de la etapa dilatante [23]. Aun así, es recomendable ensayar el fluido a velocidades muy diferentes para asegurarse de que el comportamiento no es únicamente fluidificante [27], lo que conllevaría descartar el fluido como STF.

En base al modelo reológico de Cross (apartado 4.1.3. Modelos reológicos), se ha desarrollado describe un comportamiento en tres etapas que resulta ser el que más se asemeja al comportamiento real de los fluidos dilatantes, de acuerdo con la siguiente función a trozos [20]:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \eta_I(\dot{\gamma}) = \eta_c + \frac{\eta_0 - \eta_c}{1 + \left[ K_I \cdot \frac{\dot{\gamma}^2}{\dot{\gamma}_c - \dot{\gamma}} \right]^{n_I}} & \forall \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c \\ \eta_{II}(\dot{\gamma}) = \eta_{max} + \frac{\eta_c - \eta_{max}}{1 + \left[ K_{II} \cdot \frac{\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_c}{\dot{\gamma}_{max} - \dot{\gamma}} \right]^{n_{II}}} & \forall \dot{\gamma}_c \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{max} \\ \eta_{III}(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_{max}}{1 + [K_{III} \cdot (\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_{max})]^{n_{III}}} & \forall \dot{\gamma}_{max} \leq \dot{\gamma} \end{cases} \quad (4.12)$$

Dónde:

- $\eta_n$ : Viscosidades aparentes (para cada región) [Pa·s]
- $\eta_0$ : Viscosidad inicial del fluido (sin velocidad de cizalla) [Pa·s]
- $\eta_c$ : Viscosidad mínima del fluido (donde se pasa de fluidificante a espesante) [Pa·s]
- $\eta_{max}$ : Viscosidad máxima del fluido [Pa·s]
- $n_n$ : Constantes experimentales (para cada región)
- $K_n$ : Constantes experimentales (para cada región), positivas
- $\dot{\gamma}$ : Velocidad de cizalla (variable) [s<sup>-1</sup>]
- $\dot{\gamma}_c$ : Velocidad de cizalla límite del comportamiento fluidificante [s<sup>-1</sup>]
- $\dot{\gamma}_{max}$ : Velocidad de cizalla límite del comportamiento espesante [s<sup>-1</sup>]

Todos los parámetros presentes en la ecuación pueden obtenerse experimentalmente para así poder hacerse a la idea del comportamiento del fluido. Para poder obtener los coeficientes con MATLAB, las ecuaciones que se muestran en este documento han sido ligeramente manipuladas para que todas las constantes sean positivas.

Cada tramo de la función 4.12 se corresponde con las zonas que aparecen en la Figura 4.13, en la que se ve la forma de la función. Primero existe una etapa ligeramente fluidificante, hasta una velocidad de cizalla baja. A continuación, aparece la etapa espesante, con un comportamiento pronunciado hasta alcanzar un valor limitante. A partir de ahí (velocidad crítica) vuelve a aparecer comportamiento fluidificante. Por tanto, este modelo asume que el comportamiento espesante es discontinuo.

Además en la Figura 4.13 también puede verse que los términos  $n$  de la función 4.12 se corresponden con la pendiente de la recta que aproxima la curva en cada tramo de la función.



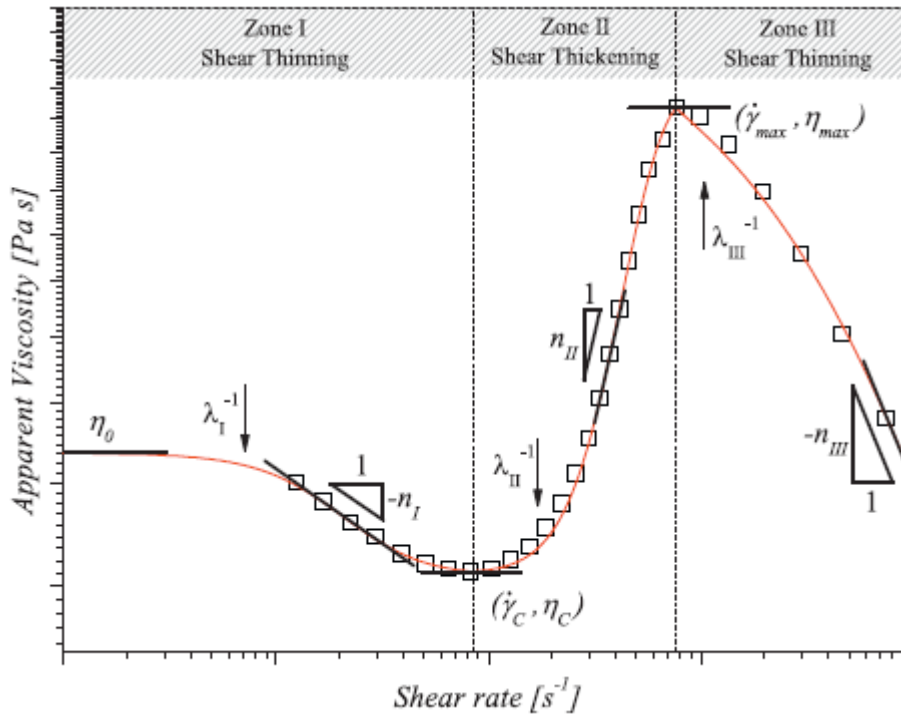


Figura 4.13: Curva de comportamiento de Aerosil® R816, se distinguen las etapas fluidificantes (I y III), así como la dilatante (II), nótese que la escala es logarítmica [20]

### 4.3. Comportamiento viscoelástico

Los fluidos STF no deberían de presentar comportamiento viscoelástico (variación de sus propiedades con el tiempo) por su definición, no obstante, en la práctica sí que pueden presentar ciertas características de este tipo antes sollicitaciones oscilatorias.

Muchos líquidos presentan una microestructura determinada en estado de reposo (estado de mínima energía) al que tienden a volver cuando se aplica una deformación. Este hecho implica que al aplicar cierta deformación al fluido se almacena en este una energía potencial que tiende a eliminar la deformación, dicha energía es la responsable del comportamiento elástico en fluidos [18].

Existe, por tanto, una fuerza de recuperación que, al principio, aumenta linealmente con la deformación. No obstante, a medida que aumenta la deformación en un fluido con comportamiento viscoelástico se observa que esa linealidad desaparece, aumentando la fuerza de forma más tenue hasta que se hace constante. Este efecto se conoce como relajación de esfuerzo, y es una forma de medir la viscoelasticidad [18].

Esta relajación de esfuerzo es inexistente en un sólido hookeano, pues en todo momento se produce un aumento lineal de la fuerza con la deformación. Por otro lado, un fluido viscoso presenta una relajación instantánea. El comportamiento viscoelástico es una mezcla de ambas situaciones, de ahí su nombre. La Figura 4.14 muestra cómo evoluciona la relajación de esfuerzo para diferentes tipos de materiales.

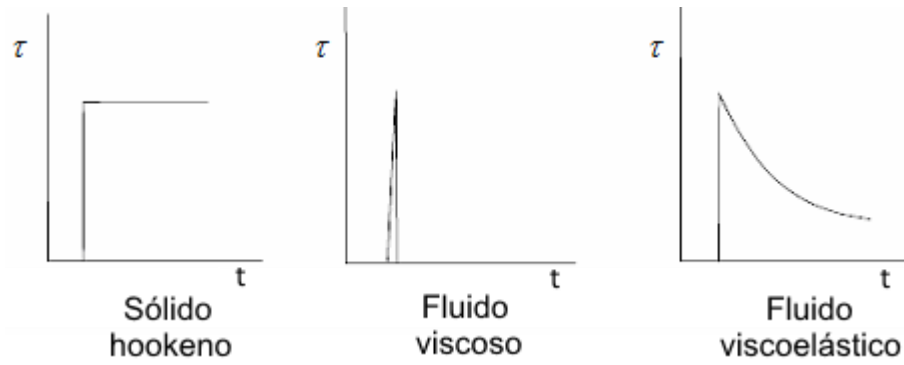


Figura 4.14: Relajación de esfuerzo para diferentes medios [18]

El módulo de relajación depende del grado de deformación [18]:

- Baja deformación ( $\gamma \leq 0,5$ ): toma un valor constante,  $G_e$
- Alta deformación ( $\gamma > 0,5$ ): se define según la siguiente ecuación:

$$G(t, \gamma) = \frac{\tau(t, \gamma)}{\gamma} \quad (4.13)$$

Dónde:

- $G$ : Módulo de relajación [Pa]
- $\gamma$ : Deformación



---

*Capítulo 5*  
*Metodología de*  
*fabricación de STF*

---

## Capítulo 5. Metodología de fabricación de STF

---

Hablar de metodología de fabricación es hablar de mezclado de los componentes que conforman un fluido espesante. Existen diferentes métodos para la sintetización de los mismos:

- Mezclado mecánico: Es el proceso de mezclado más sencillo, consiste en remover el fluido bien manualmente [28] o con la ayuda de algún aparato eléctrico [29]. Mediante este método se va removiendo la fase dispersante a medida que se va añadiendo poco a poco la fase dispersa. En algunos casos este método se combina con el sonoquímico [29].
- Mezclado sonoquímico: El fluido es “bombardeado” con ultrasonidos, propagándose ondas sonoras de forma cíclica, que a su vez provocan a su paso zonas de alta y baja presión. Durante el ciclo de baja presión, se crean pequeñas burbujas de vacío en el líquido (proceso que se conoce como cavitación) que crecen hasta alcanzar cierto tamaño. Cuando este tamaño es alcanzado, las burbujas colapsan violentamente durante la sobrepresión, generando presiones localmente muy altas y chorros de líquido a gran velocidad, que inducen turbulencias y corrientes en toda la mezcla [30]. Este sistema proporciona mezclas más homogéneas que con cualquier otro procedimiento, logrando distribuir las partículas en el sólido de forma uniforme y con tamaños de partícula pequeños y similares [23].

Hay tener en cuenta que quedan burbujas de aire cuando se termina de mezclar, por lo que algunos autores recurren a someter al fluido al vacío antes de ensayarlo para eliminar estas burbujas [28].

Dado que este trabajo es una primera fase de la investigación, no está justificado recurrir a sistemas de mezclado por ultrasonidos, por su elevado precio. Por ello se ha decidido recurrir a un mezclado manual con la ayuda de pequeño mezclador eléctrico (que solo funciona para grados de concentración muy bajos). Tampoco se ha decidido someter el fluido al vacío, ya que no se ha observado que esto tenga un impacto relevante sobre sus propiedades en mezclas evaluadas anteriormente por el departamento.

### 5.1. Materiales utilizados

Los fluidos espesantes son suspensiones o coloides (ver Glosario) en los que a menudo se emplea como base un fluido newtoniano. Estas mezclas se sintetizan a partir de una gran variedad de materias primas, pero la investigación no cesa, en busca de fluidos espesantes cada vez más eficaces y económicos.

En la mayor parte de los casos de aplicación industrial, estas mezclas son coloides en los que la fase dispersa (solute) son nanopartículas. La mayoría de los materiales empleados son derivados del silicio, tanto sílice ( $\text{SiO}_2$ ) como siliconas (polímeros a base de silicio y oxígeno). También se emplean otro tipo de materiales como el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) o el ya mencionado caso de la maicena.

Existe mayor variedad de materiales en lo que se refiere a la fase dispersante (disolvente). Si bien existen aplicaciones en las que se emplea agua o aceite mineral, en la mayor parte de los casos se recurre a diferentes tipos de polímeros.

Para este proyecto se ha decidido elaborar un coloide con polipropilenglicol como fase dispersante y sílice pirógena como fase dispersa.

#### **5.1.1. Sílice pirógena**

La sílice pirógena o pirogénica es un polvo blanco compuesto de Silicio y Oxígeno, con fórmula  $\text{SiO}_2$ . Se ha seleccionado la sílice de Aldrich (ver Anexo B) que puede verse en la Figura 5.1 junto con la pala que se ha empleado para verterlo.



**Figura 5.1: Sílice pirógena empleada**

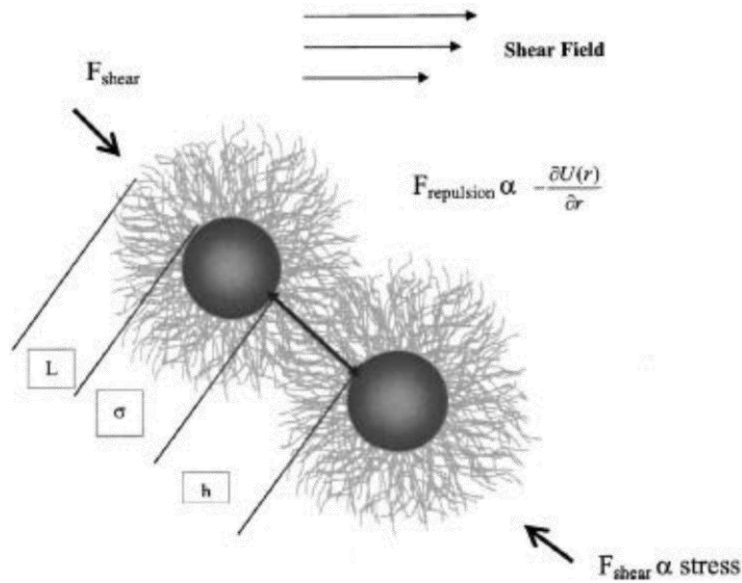
Los motivos para utilizarla son las propiedades reológicas que ofrece, ya que presenta una baja densidad aparente y una gran área superficial. Dada su morfología de cadena y sus propiedades superficiales, las moléculas presentan entre sí puentes de hidrógeno. Además posee carácter hidrófilo, debido a la presencia de grupos  $-\text{OH}$  en la superficie, lo que también ayuda con el comportamiento espesante [23].

El proceso de obtención de la sílice es el siguiente: en un horno se introduce tetracloruro de silicio ( $\text{SiCl}_4$ ) con oxihidrógeno, hasta provocar la combustión entre ambos [22]. El humo que se desprende en el horno se recoge dando lugar a la sílice pirógena [31]. El resultado es una reacción de hidrólisis que da lugar a la formación de una red de partículas que permanecen unidas mediante enlaces de hidrógeno.

#### **5.1.2. Polipropilenglicol (PPG)**

Los líquidos poliméricos se emplean para la fabricación de STF por la capacidad de estos polímeros de adsorber sobre la superficie de la fase dispersa. Esto se traduce en un aumento del diámetro hidrodinámico del coloide, y por tanto, en la densidad.

Además hay que tener en cuenta que el empleo de estos materiales redunda en una modificación de la velocidad de cizalla a partir de la cual se observa comportamiento espesante. Esto ocurre porque el polímero forma una capa que recubre las partículas de la fase dispersa como se ve en la Figura 5.2, surgiendo una fuerza de repulsión que se compensa cuando se aplica un esfuerzo cortante.



**Figura 5.2: Balance de fuerza para predecir el espesamiento en coloides a base de polímero [23]**

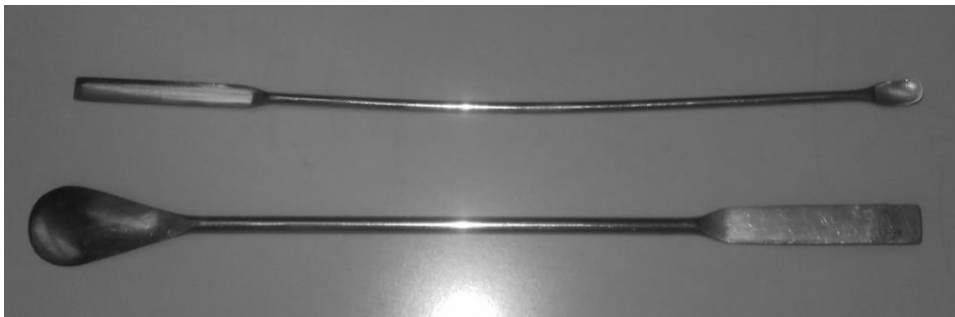
La selección del polipropilenglicol está motivada por sus propiedades, que son muy similares a las del polietilenglicol, pero con una toxicidad mucho más baja (importante porque se va a emplear en un entorno no industrial). Entre esas propiedades se encuentra una buena estabilidad térmica [23], que es necesaria para satisfacer la normativa de los STU. En este caso se ha optado el polipropilenglicol 1,200 de Aldrich (Anexo B).

## 5.2. Método de mezcla

El proceso de fabricación que se ha seguido ha sido el mismo para ambas mezclas, si bien durante la segunda ya se han tenido en cuenta ciertos aspectos que se observaron tras la primera sintetización.

Las herramientas empleadas han sido muy sencillas:

- Un juego de dos varillas (Figura 5.3) para remover y verter la sílice
- Una botella recortada (Figura 5.4) para pesar la sílice pirogénica
- Un vaso de plástico (Figura 5.5) para pesar el polipropilenglicol (PPG)
- Báscula de bolsillo (Figura 5.6) para medir las cantidades a emplear



**Figura 5.3: Varillas de laboratorio empleadas para mezclar**



**Figura 5.4:** Trozo de botella empleado para pesar la sílice



**Figura 5.5:** Vaso empleado para pesar el PPG



**Figura 5.6:** Báscula empleada para pesar los productos



Lo primero que se ha hecho es determinar las cantidades necesarias de cada producto para cada mezcla, determinando el peso de cada uno, como se ve en la Tabla 5.1. La cantidad total de fluido necesaria es de 130 ml, por lo que se ha decidido fabricar unos 130 g de fluido para tener cierto margen (la densidad de la mezcla es inferior a 1 g/ml). Para la realización de la segunda mezcla se han empleado 131 g para cubrirse frente a posibles mermas.

**Tabla 5.1: Cantidades de producto empleadas en las mezclas**

	Mezcla 1	Mezcla 2
Grado de concentración	20 %	15 %
Cantidad de polipropilenglicol	$130 \cdot 80 \% = 104 \text{ g}$	$131 \cdot 85 \% = 113,35 \text{ g}$
Cantidad de sílice pirógena	$130 \cdot 20 \% = 26 \text{ g}$	$131 \cdot 15 \% = 19,65 \text{ g}$

Una vez se han determinado las cantidades necesarias, se procede al pesado de las mismas en la báscula. A continuación se introducen en el recipiente todo el polipropilenglicol y una pequeña cantidad de sílice. Una vez hecho esto se remueve hasta que la mezcla que sea homogénea y se añade otro poco de sílice, repitiendo este proceso hasta agotar toda la sílice.

Al principio, cuando la cantidad de sílice añadida es pequeña, se puede recurrir al mezclador eléctrico de la Figura 5.7; no obstante, a medida que la densidad de la mezcla va aumentando este deja de funcionar y no queda más remedio que proseguir manualmente.



**Figura 5.7: Mezclador eléctrico**

En base a lo visto en la primera mezcla, durante la segunda se ha procedido a mezclar una mayor cantidad de sílice directamente al principio (aproximadamente un tercio de toda la que se ha utilizado), y se ha echado el PPG por encima, para evitar que la sílice se vuele durante el mezclado. Esto se hace porque tras la primera mezcla se comprobó que las dificultades para el mezclado no surgen hasta que se ha añadido una cantidad considerable de sílice.

A medida que se va añadiendo cantidad de sílice la mezcla adopta el aspecto que se aprecia en la Figura 5.8. A la hora de removerlo se nota que se trata de un líquido denso, pero no resulta costoso darle vueltas de momento, si bien el mezclador eléctrico ya no es capaz de continuar.



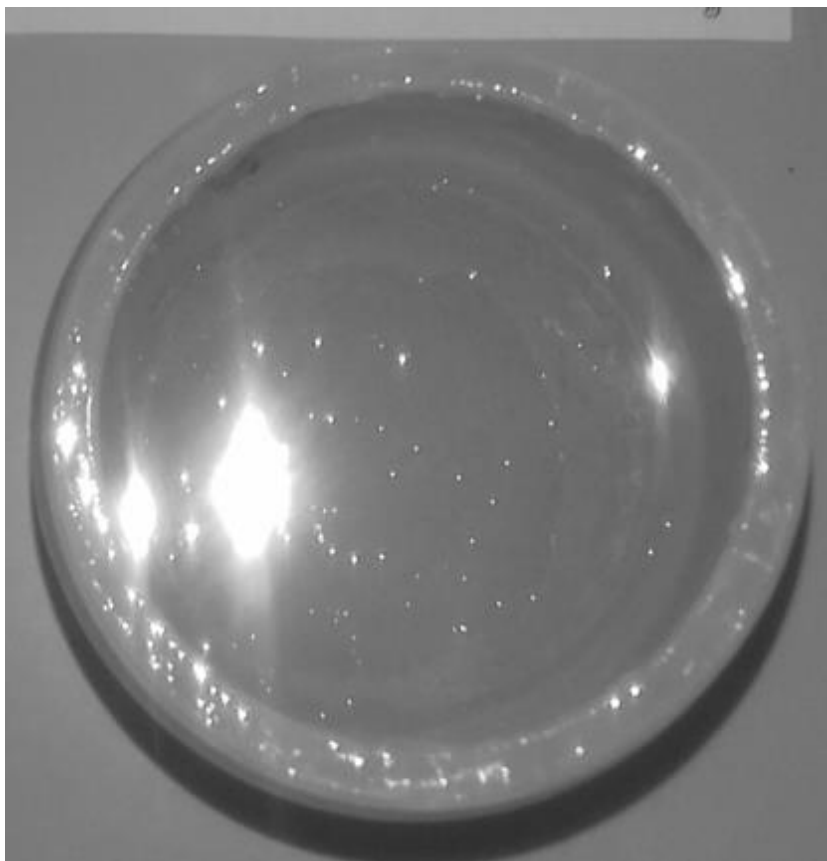
**Figura 5.8:** 2ª mezcla cuando se ha echado aproximadamente el 50% de la sílice total empleada

Cuando ya se ha echado toda la sílice, la mezcla parece estar compuesta por una especie de granos de sal, casi sólidos, como se ve en la Figura 5.9. En ese momento hay que continuar removiendo durante bastante tiempo y aplicando un esfuerzo considerable (se aprecia un comportamiento casi sólido), hasta que el fluido evolucione desde ese estado granular hasta el líquido.

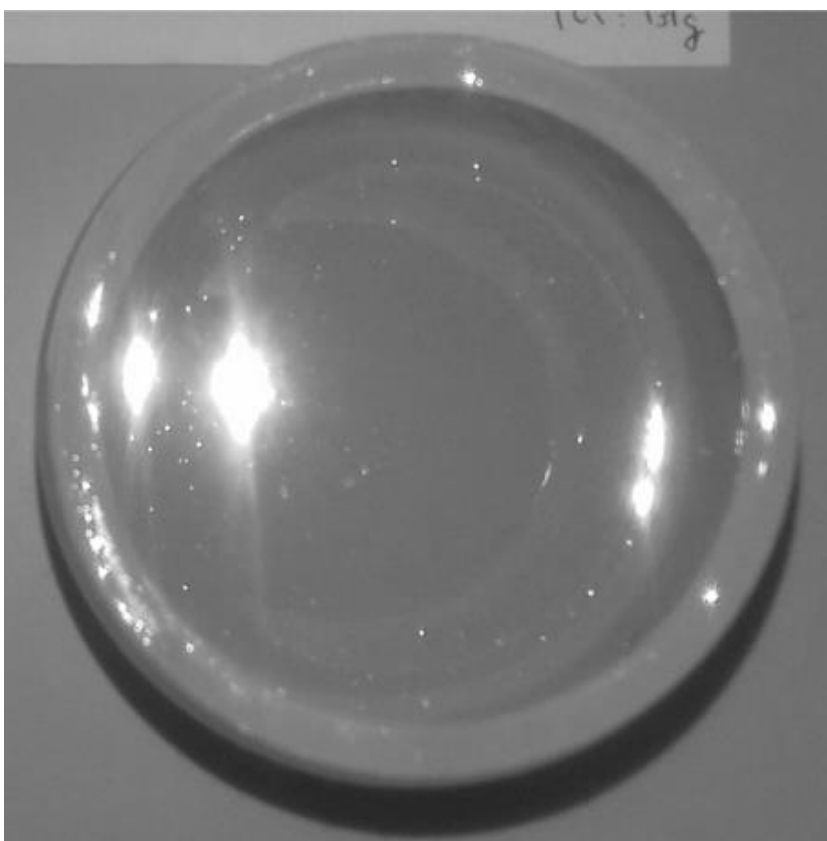


**Figura 5.9:** Etapa granular de la 2ª mezcla con toda la sílice vertida

Cuando se termina esta etapa, el fluido se debe dejar en reposo durante al menos 3 días para que la mezcla se estabilice y poder llevar a cabo los ensayos pertinentes, además así se consigue que desaparezcan las burbujas de gas. El fluido obtenido en la 1ª mezcla puede verse en la Figura 5.10, y el de la 2ª en la Figura 5.11. En ambas se aprecia que quedan burbujas de aire que han surgido durante el proceso de mezclado.



**Figura 5.10: 1ª mezcla (20 %)**



**Figura 5.11: 2ª mezcla (15 %)**

---

*Capítulo 6*  
*Caracterización*  
*Reológica de los fluidos*

---

## Capítulo 6. Caracterización reológica de los fluidos

---

Para determinar las propiedades de las mezclas sintetizadas, los fluidos han sido sometidos a un ensayo reológico con el reómetro de platos paralelos de la Figura 6.1 (TA Instruments AR2000ex) en la Fundación IMDEA Materiales de Getafe.



Figura 6.1 TA Instruments AR2000ex

El modo de utilización es sencillo, se vierte una pequeña cantidad del fluido a ensayar en el plato inferior, y luego se baja el plato superior para apretar el fluido hasta que sobresalga ligeramente por los laterales pero sin caerse, como se ve en la Figura 6.2.

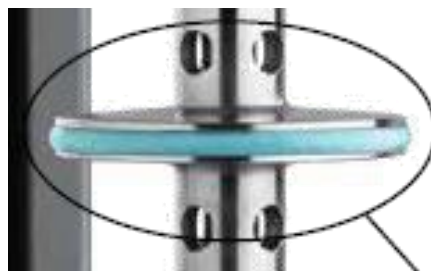


Figura 6.2 Fluido ajustado en un reómetro de platos paralelos [32]

Una vez ajustado esto se introducen en el ordenador los parámetros del ensayo. Antes de que el reómetro comience a tomar datos, se toma un tiempo para controlar la temperatura de la muestra y aproximarla lo máximo posible al valor introducido en el programa. Además, antes de realizar la primera prueba, se somete al fluido a un “pre-shear”, es decir, una agitación a baja velocidad para eliminar tensiones residuales y estabilizar el fluido.

Para el análisis de los resultados se ha empleado el programa Origin Pro, con el que se han obtenido las gráficas; y MATLAB, con el que se han realizado las regresiones de las curvas experimentales.

## 6.1. Procedimiento

En el laboratorio se ha procedido a realizar tres tipos de ensayos diferentes a cada muestra, uno de ellos simple y otros dos de tipo oscilatorio. Aparte de evaluar las propiedades de las dos muestras de STF sintetizadas, también se han evaluado las características del Polipropilenglicol sin mezclar.

A continuación se detallan las características de cada ensayo y la secuencia en la que han sido llevados a cabo.

### 6.1.1. “Flow Ramp”

El “Flow Ramp” es un ensayo con el que se determina la relación de la viscosidad o el esfuerzo cortante con la velocidad de cizalla (shear rate). Durante el mismo, ambos platos del reómetro giran en sentido contrario a una velocidad creciente.

En base a los experimentos llevados a cabo anteriormente por el Departamento de Ingeniería Mecánica, se ha comprobado que este ensayo debe realizarse al menos tres veces para obtener resultados fiables. Esto implica descartar los dos primeros ensayos, en los que se aprecia una viscosidad significativamente superior a la que se obtiene en los ensayos posteriores, que ya son muy homogéneos.

El tercer ensayo se ha realizado con las condiciones de la Tabla 6.1.

**Tabla 6.1: Condiciones del tercer ensayo “Flow Ramp”**

Temperatura indicada	25 °C
Tiempo de acondicionamiento <sup>5</sup>	15 s
Duración	180 s
Velocidad de cizalla inicial	0,1 s <sup>-1</sup>
Velocidad de cizalla final	100 s <sup>-1</sup>

Durante el tercer ensayo no es necesario realizar pre-cizallamiento, pues el fluido ya ha sido removido anteriormente. Este pre-cizallamiento si es necesario cuando se realiza el primer ensayo, pues es una forma de asegurarse de que el fluido está perfectamente mezclado.

<sup>5</sup> Tiempo que emplea el reómetro para ajustar la temperatura del fluido a la temperatura indicada.

### 6.1.2. Ensayos oscilatorios

Los ensayos oscilatorios sirven para evaluar las propiedades viscoelásticas de los fluidos. Consisten en la aplicación de una pequeña deformación o esfuerzo al fluido en forma sinusoidal, obteniéndose como respuesta el otro [32].

Así, si se aplica una señal de deformación según la siguiente expresión [18]:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (6.1)$$

Dónde:

- $\gamma$ : Deformación
- $\gamma_0$ : Deformación máxima
- $\omega$ : Velocidad angular [rad/s]
- $t$ : Tiempo [s]

Se obtendrá una señal de esfuerzo cortante, que depende del tipo de medio (como se ve en la Figura 6.3):

- Sólido Hookeano:

$$\tau = G \cdot \gamma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (6.2)$$

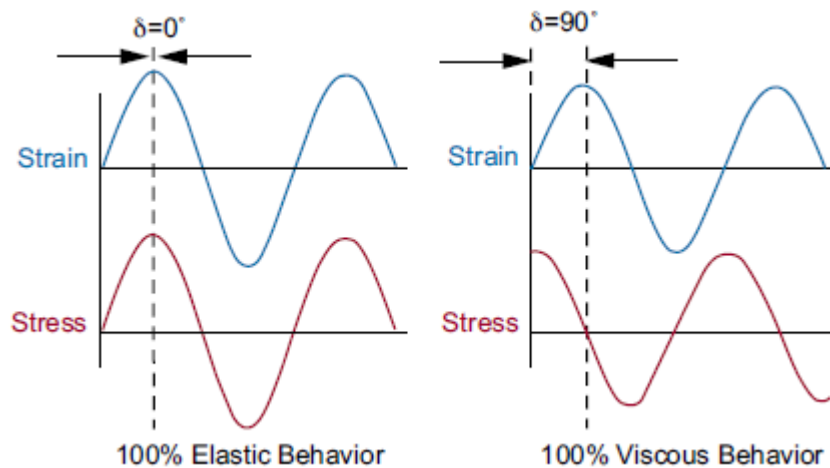
Dónde:

- $\tau$ : Esfuerzo cortante [Pa]
- $G$ : Módulo de relajación [Pa]
- Fluido viscoso:

$$\tau = \eta \cdot \omega \cdot \gamma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = \eta \cdot \omega \cdot \gamma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad (6.3)$$

Dónde:

- $\eta$ : Viscosidad [Pa·s]
- $\delta$ : Ángulo de desfase [rad]



**Figura 6.3:** Señales de deformación (Strain) y esfuerzo (Stress) para un sólido (izquierda) y para un fluido viscoso (derecha) [32]

Si se aplica un esfuerzo cortante, se obtendrá una señal de deformación, teniendo ambas señales la misma función que en el caso anterior.

Comparando las ecuaciones 6.1 con la 6.2 y la 6.3 respectivamente se observa que el esfuerzo y la deformación están en fase en el caso de un sólido ideal; mientras que presentan un desfase de  $90^\circ$  en el caso de un fluido ideal.

En el caso de los fluidos viscoelásticos ese ángulo de desfase se encontrará entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . De esta forma también puede definirse el esfuerzo cortante de un fluido viscoelástico a partir del máximo ( $\tau_0$ ):

$$\tau = \tau_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad (6.4)$$

Ahora se puede definir un parámetro conocido como módulo complejo que mide la resistencia a la deformación en función del esfuerzo aplicado. El módulo complejo se define como:

$$G^* = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (6.5)$$

Dónde:

- $G^*$ : Módulo Complejo [Pa]
- $\tau_0$ : Esfuerzo máximo [Pa]
- $\gamma_0$ : Deformación máxima

A continuación se define la función de esfuerzo como la suma de dos funciones, una en fase, y otra con un desfase de delta  $\delta$ ; como se observa en la Figura 6.4.

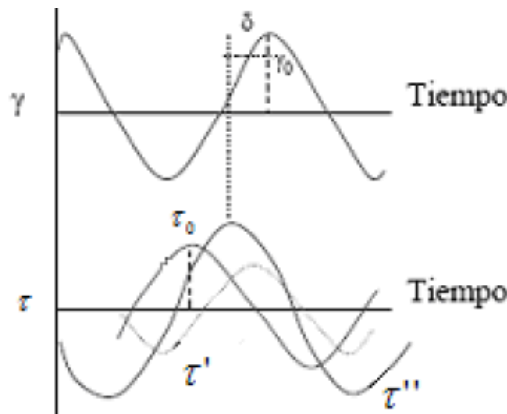


Figura 6.4: Descomposición de la señal de esfuerzo [18]

Todo esto implica que se puede determinar la composición de comportamiento elástico y viscoso, para ello se recurre a una relación trigonométrica de  $\delta$ :

$$\tan \delta = \frac{\tau_0''}{\tau_0'} \quad (6.6)$$

Dónde:

- $\tan \delta$ : Tangente de pérdida
- $\tau_0''$ : Esfuerzo máximo de la señal desfasada [Pa]
- $\tau_0'$ : Esfuerzo máximo de la señal en fase [Pa]



Por lo tanto, cuanto mayor sea  $\tan \delta$ , mayor será la proporción de comportamiento viscoso y menor la de comportamiento elástico. Ese valor será infinito en el caso de un comportamiento totalmente viscoso y 0 en el caso de un comportamiento totalmente elástico.

Ahora los módulos pueden descomponerse en dos:

- Módulo elástico o de almacenamiento (en fase):  $G' = \frac{\tau_0'}{\gamma_0}$  ( 6.7 )

- Módulo viscoso o de pérdida (desfase):  $G'' = \frac{\tau_0''}{\gamma_0}$  ( 6.8 )

El motivo por el que reciben esa denominación es el siguiente:

- Módulo elástico o de almacenamiento: mide la energía que es almacenada durante el ensayo y que luego se invierte en recuperar la forma original.
- Módulo viscoso o de pérdida: mide la energía empleada para fluir y disipada en forma de calor.

De forma que la ecuación 6.6 puede reformularse como:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad ( 6.9 )$$

La ecuación 6.9 se ve gráficamente como se muestra en la Figura 6.5, y permite redefinir el Módulo Complejo como un número complejo:

$$G^* = G' + iG'' \quad ( 6.10 )$$

Dónde:

- $i = \sqrt{-1}$

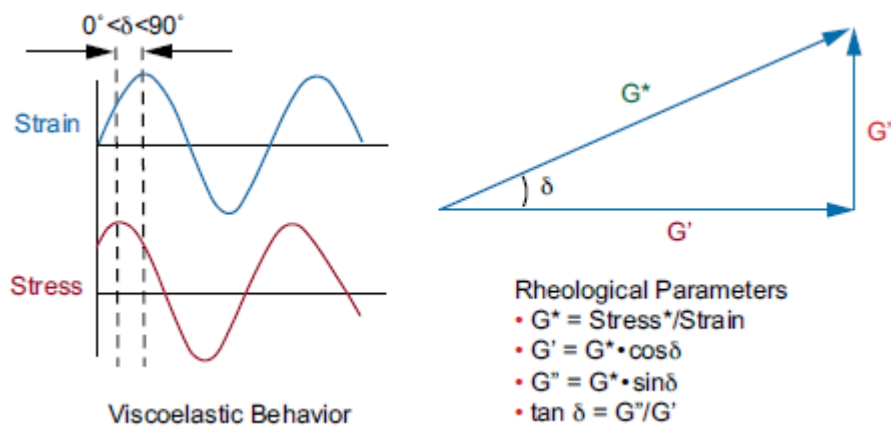


Figura 6.5: Representación geométrica de los parámetros Viscoelásticos [32]

A partir de aquí se puede definir la viscosidad también en los tres términos empleados hasta ahora:

$$\eta^* = \eta' + i\eta'' \quad (6.11)$$

Dónde:

- $\eta^*$ : Viscosidad compleja [Pa·s]
- $\eta'$ : Viscosidad dinámica (en fase) [Pa·s]
- $\eta''$ : Viscosidad en desfase, no tiene nombre [Pa·s]

No obstante, tanto el módulo complejo ( $G^*$ ) como  $\delta$  dependen de la frecuencia, que se relaciona con la velocidad angular de la siguiente manera:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} \quad (6.12)$$

Dónde:

- $\nu$ : Frecuencia [Hz]
- $\omega$ : Velocidad o frecuencia angular [rad/s]

#### 6.1.2.1. Ensayos Oscilatorios con Frecuencia Angular Constante

Consisten en la aplicación de una señal de deformación, obteniéndose como respuesta la de esfuerzo. Para ello se fija una frecuencia angular, en este caso de: 5 rad/s, 10 rad/s, 15 rad/s y 20 rad/s; y se va aplicando aumentando progresivamente la amplitud de deformación (hasta 100 Hz en este caso).

Lo que hace el reómetro es girar uno de los platos del mismo hasta cierta posición, a una velocidad angular fija, para a continuación girar en la otra dirección los mismos grados. Este proceso se repite aumentando los grados girados en cada repetición (aumentando así la deformación)

En estos ensayos también pueden obtenerse las curvas de linealidad de los fluidos para cada punto medido por el reómetro. Se observa que este está deformado, ya que no se trata de un sólido elástico.

#### 6.1.2.2. Ensayos Oscilatorios con Amplitud de Deformación Constante

Consisten en la aplicación de una señal de esfuerzo, obteniéndose como respuesta la de deformación. Para ello se fija una amplitud de deformación, en este caso: 400%, 500%, 600% y 700%; y se va aumentando progresivamente la frecuencia angular (hasta 100 Hz en este caso).

Lo que hace el reómetro es girar uno de los platos del mismo hasta cierta posición prefijada, para a continuación girar en la otra dirección los mismos grados. Este proceso se repite aumentando la velocidad de giro en cada repetición (aumentando así la frecuencia angular)

#### 6.1.2.3. Condiciones de los Ensayos Oscilatorios

Las condiciones de los ensayos oscilatorios se recogen en la Tabla 6.2. No se ha aplicado pre-removido del fluido (pre-shear) dado que ya se habían realizado otros ensayos antes (dos "Flow Ramp").

**Tabla 6.2: Condiciones de los ensayos oscilatorios**

Temperatura	30 °C
Tiempo de acondicionamiento <sup>5</sup>	1,0 s
Adquisición de datos	Transitorio

### 6.1.3. Secuencia seguida

Los ensayos, para todos las muestras excepto para la de PPG, se han realizado siguiendo este orden

1. Dos ensayos “flow ramp” consecutivos
2. Ensayos oscilatorios de frecuencia angular constante
3. Ensayo “flow ramp” 3
4. Ensayos oscilatorios amplitud de deformación constante

En la muestra de Polipropilenglicol solo se han realizado dos ensayos “flow ramp” consecutivos.

## 6.2. Regla de Cox-Mertz modificada

La regla de Cox-Mertz modificada establece que curva de viscosidad aparente ( $\eta$ ) en función de la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) es muy similar a la curva de viscosidad compleja ( $\eta^*$ ) en función de la frecuencia angular ( $\omega$ ). Sin embargo, para que ambas curvas sean comparables entre sí, la frecuencia angular debe multiplicarse por la amplitud de deformación ( $\gamma_0$ ), como se indica en la siguiente expresión [33]:

$$\eta(\dot{\gamma}) \approx \eta^*(\omega \cdot \gamma_0) \approx \eta^*(\omega_0 \cdot \gamma) \quad (6.13)$$

Dónde:

- $\eta$ : viscosidad aparente [Pa·s]
- $\eta^*$ : viscosidad compleja [Pa·s]
- $\omega$ : frecuencia angular [1/s], variable
- $\gamma$ : amplitud de deformación, variable
- $\omega_0$ : frecuencia angular [1/s], constante
- $\gamma_0$ : amplitud de deformación, constante

Tanto el término ( $\omega \cdot \gamma_0$ ) como el  $\omega_0 \cdot \gamma$  de la ecuación se denominan velocidad de cizalla dinámica y sus unidades son también 1/s.

Aunque originalmente esta regla fue creada para ensayos con amplitud de deformación constante, en este trabajo se considera que la misma regla es extrapolable a los ensayos con frecuencia angular constante, ya que son ensayos similares.

Esta regla no se cumple en todos los fluidos [33], por lo que en este trabajo se abordará la cuestión desde el punto de vista de los STF, comprobando si las muestras sintetizadas se ajustan a esta regla.

---

*Capítulo 7*  
*Modelos de*  
*comportamiento de STU*

---

## Capítulo 7. Modelos de comportamiento de STU

El funcionamiento de los STU fue introducido en el Capítulo 3, donde se explicó cómo reaccionan los STU en función de las solicitaciones. En este apartado lo que se pretende es explicar analíticamente como es ese comportamiento.

El modelo matemático ideal que dan diferentes fabricantes para los STU viene dado por la siguiente ecuación [8,9,11,14]:

$$F = C \cdot v_p^\alpha \quad (7.1)$$

Dónde:

- $F$  : Fuerza de reacción [N]
- $C$  : Constante de rigidez del dispositivo  $\left[\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{mm}}\right]$
- $v_p$  : Velocidad del pistón  $\left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right]$
- $\alpha$  : Exponente adimensional

Si se representa gráficamente la ecuación 7.1 se obtiene el gráfico de la Figura 7.1, donde se aprecia que existe una velocidad de activación que es muy pequeña y es difícil de determinar a simple vista.

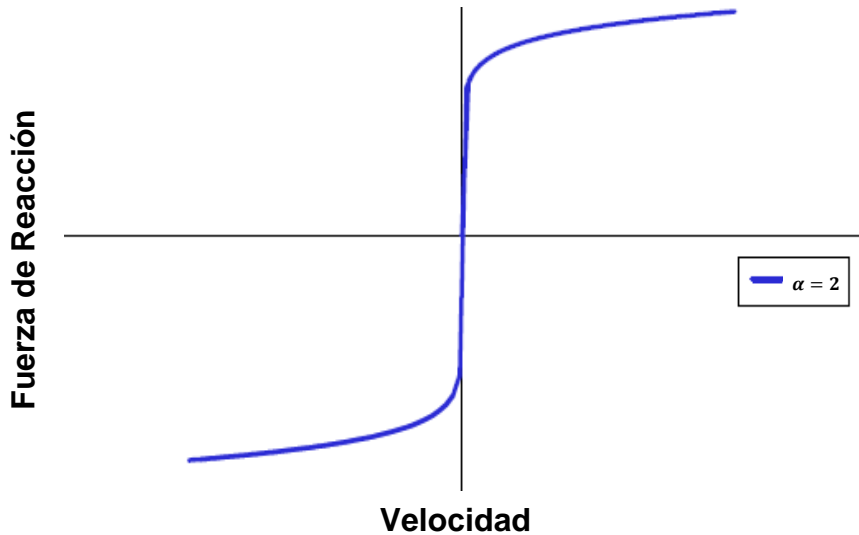


Figura 7.1: Fuerza de reacción frente a la velocidad del fluido [9]

Lo más importante de la Figura 7.1, es determinar la velocidad de activación, y a la vista de la misma se aprecia que no existe un cambio repentino de unión elástica a unión rígida, sino que progresivamente aumenta la fuerza hasta alcanzar un valor muy alto. Aun así, puede apreciarse que la pendiente de la curva al principio es enorme, por lo que el rango de velocidades a las que la unión es elástica es muy reducido.

La Figura 7.2 muestra la fuerza de reacción en función de la carrera para distintas acciones. En azul se ven las condiciones de servicio y en rojo las de una carga súbita. Se ve como condiciones de servicio la fuerza no es nula, pero es muy baja.

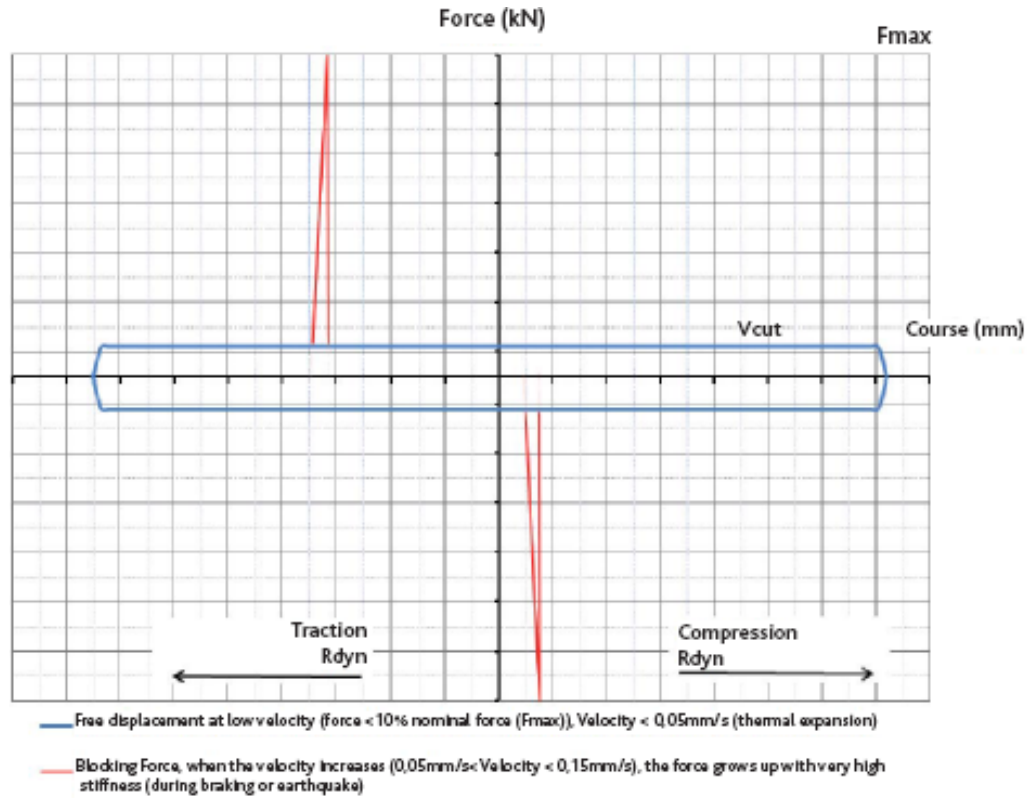


Figura 7.2: Diagrama de fuerza teórica frente a la carrera [11]

La ecuación 7.1 es de gran utilidad para el usuario del dispositivo, pero obtenerla a priori no es sencillo. Si bien puede determinarse directamente mediante ensayos, se han encontrado dos modelos que tratan de describir cómo evoluciona la fuerza con la velocidad a partir de la viscosidad del fluido y de la geometría del STU. A partir de estos modelos se pueden obtener curvas de comportamiento, y después aproximarlas al modelo ideal de la ecuación 7.1 para determinar los coeficientes  $C$  y  $\alpha$ .

### 7.1. Modelo de Jie Liang

La mayoría de los parámetros que definen este modelo matemático se pueden ver en la Figura 7.3 (el resto se explican posteriormente), y son los siguientes [10,34]:

- $p$ : Presión del fluido [MPa]
- $F$ : Fuerza de aplicación [N]
- $F_c$ : Fuerza aplicada en la sección transversal del orificio [N]
- $S_p$ : Área del pistón [mm<sup>2</sup>]
- $R_0$ : Radio de la carcasa [mm]
- $R_i$ : Radio grande [mm]
- $r$ : Radio pequeño [mm]
- $L$ : Longitud del pistón [mm]
- $v$ : Velocidad del fluido [mm/s]
- $D$ : Dimensión del orificio anular [mm]
- $\tau_s$ : Esfuerzo cortante [N/m<sup>2</sup>]

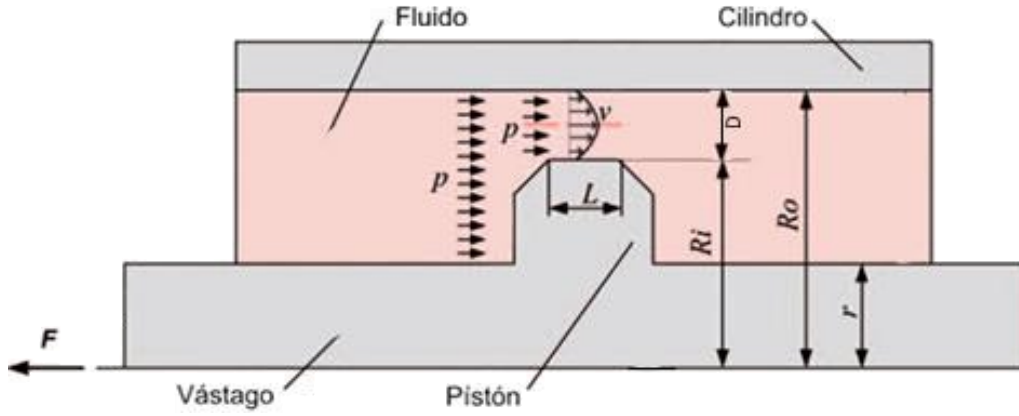


Figura 7.3: Parámetros del modelo [10]

Lo primero que asume este modelo es que cuando se aplica una carga al dispositivo, la distribución de presión en su interior sigue el principio de Pascal, es decir, es constante en toda la cavidad. La presión queda definida entonces por la siguiente ecuación:

$$p = \frac{F}{S_p} = \frac{F}{\pi \cdot (R_i^2 - r^2)} \quad (7.2)$$

Ahora puede definirse la fuerza aplicada ( $F_C$ ) en el orificio como:

$$F_C = 2\pi \cdot R_i \cdot D \cdot p \quad (7.3)$$

A partir de la definición de esfuerzo cortante ( $\tau_s$ ) y de los parámetros empleados por este modelo se puede llegar a la expresión:

$$\tau_s = \frac{F_C}{4\pi R_i L} = \frac{D \cdot p}{2L} \quad (7.4)$$

Se puede asumir, a efectos prácticos, que el orificio se comporta como dos platos paralelos por los que discurre el fluido, suposición que puede hacerse porque las dimensiones del orificio anular y la velocidad del pistón son bastante pequeñas comparadas con los valores del radio del pistón y la velocidad media del fluido en el orificio, respectivamente [34].

En estas condiciones puede emplearse el modelo de flujo laminar entre platos paralelos, en el que se considera que el fluido se mueve entre dos placas (sólidos rígidos) separadas una distancia  $d$ . Además estas placas son infinitas en la dirección horizontal (según la Figura 7.4) y las propiedades del fluido no cambian en dicha dirección. Si aplicamos este modelo se observa que el flujo de fluido sigue una distribución de velocidades, de forma que la velocidad es nula en el contacto con la pared del conducto, como se ve en la Figura 7.4.

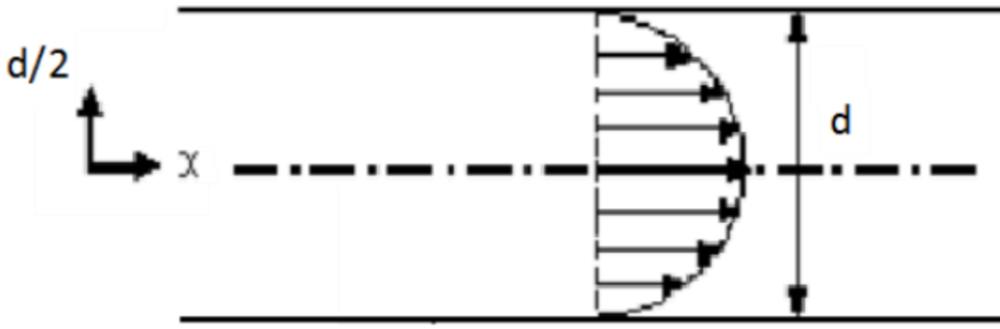


Figura 7.4: Distribución de velocidades en el orificio según el modelo [34]

La siguiente suposición que realiza este modelo es que el fluido es incompresible, lo cual implica que el caudal volumétrico asociado al movimiento del pistón es igual al que se genera en el orificio anular. Se puede obtener así la siguiente expresión:

$$v_p \cdot s_p = v_c \cdot s_c \quad (7.5)$$

Dónde

- $v_p$ : Velocidad media del pistón [mm/s]
- $s_p$ : Sección del pistón [mm<sup>2</sup>]
- $v_c$ : Velocidad media del fluido en el orificio [mm/s]
- $s_c$ : Sección del orificio [mm<sup>2</sup>]

Operando en la ecuación 7.5, se puede determinar la velocidad media del fluido a partir de la velocidad del pistón:

$$v_c = \frac{s_p}{s_c} \cdot v_p = \frac{\pi (R_i^2 - r^2)}{2\pi \cdot R_i \cdot D} \cdot v_p = \frac{(R_i^2 - r^2)}{2R_i \cdot D} \cdot v_p \quad (7.6)$$

J. Liang establece a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes y las suposiciones previas una relación entre la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) y la velocidad media del fluido en el orificio ( $v_c$ ) o del pistón ( $v_p$ ) [10]:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} = \frac{3v_c}{R_0 - R_i} = \frac{3}{(R_0 - R_i)^2} \cdot \frac{(R_i^2 - r^2)}{2R_i} \cdot v_p = N_1 \cdot v_p \quad (7.7)$$

donde  $N_1$  representa un parámetro geométrico, que calculado a partir de las cotas del STU (Anexo C) en mm ha resultado ser:

$$N_1 = 134,46 \text{ mm}^{-1}$$

Además también existe una relación entre el esfuerzo cortante ( $\tau_s$ ) y la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) a través de la viscosidad ( $\eta$ ):

$$\tau_s = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (7.8)$$

Dado que el fluido que se emplea en este trabajo presenta una variación de la viscosidad con la velocidad de cizalla, la expresión anterior puede combinarse con las



obtenidas para cada uno de los dos fluidos empleados y obtener una distribución del esfuerzo cortante con la velocidad de cizalla.

Despejando en la ecuación 5.1, se puede obtener una función de la fuerza en función de la presión:

$$F = p \cdot s_p = p \cdot \pi \cdot (R_i^2 - r^2) \quad (7.9)$$

Por tanto, para poder resolver la ecuación se debe de hallar  $p$  (presión) a partir de la viscosidad, despejando de la ecuación 5.4 y 5.8:

$$p = \frac{\tau_s \cdot 2L}{D} = \frac{\eta \cdot \dot{\gamma} \cdot 2L}{D} = \frac{\eta \cdot 2L}{D} \cdot \frac{3v_c}{R_0 - R_i} \quad (7.10)$$

Sustituyendo  $p$  en la ecuación 5.10, se obtiene lo siguiente:

$$F = \frac{\eta \cdot 2L}{D} \cdot \frac{3v_c}{R_0 - R_i} \cdot \pi \cdot (R_i^2 - r^2) \quad (7.11)$$

Y para que quede en función de la velocidad del pistón se realiza la siguiente manipulación:

$$F = \eta \cdot v_p \cdot \frac{3L \cdot \pi \cdot (R_i^2 - r^2)^2}{R_i \cdot D^3} \cdot 10^{-6} = \eta [\text{Pa} \cdot \text{s}] \cdot v_p \left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \cdot N_2 \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{mm}} \right] \quad (7.12)$$

dónde  $N_2$  representa un parámetro geométrico, que calculado a partir de las cotas del STU (Anexo C) en mm ha resultado ser:

$$N_2 = 13,51 \frac{\text{m}^2}{\text{mm}}$$

## 7.2. Modelo de Spencer

Spencer [35] ha desarrollado un modelo matemático para predecir el comportamiento de amortiguadores viscosos rellenos de fluidos magnetoreológicos, pero este modelo puede ser adaptado al STU realizando pequeñas modificaciones.

El modelo original es axial-simétrico, pero aplicando pequeñas modificaciones ha desarrollado una variante basada en platos paralelos que es válida dado el pequeño error que se comete (inferior al 2%). Este modelo es más sencillo y se basa en el esquema de la Figura 7.5. En ella se pueden distinguir los parámetros que emplea este modelo:

- $P_0$ : presión del fluido antes del pistón [MPa]
- $P_L$ : presión del fluido después del pistón [MPa]
- $F$ : Fuerza de aplicación [N]
- $v_c$ : Velocidad del pistón [mm/s] (en el dibujo  $v_0$ )
- $R_0$ : Radio de la carcasa [mm]
- $R_i$ : Radio grande [mm]
- $D$ : Dimensión del orificio anular [mm]

- $\tau_s$ : Esfuerzo cortante [ $\text{N/m}^2$ ]
- $L$ : Longitud del orificio [ $\text{mm}$ ] (no está dibujado)

Aparte de estos parámetros también hay que definir el Área efectiva del pistón, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$A_P = \pi \cdot R_i^2 \quad (7.13)$$

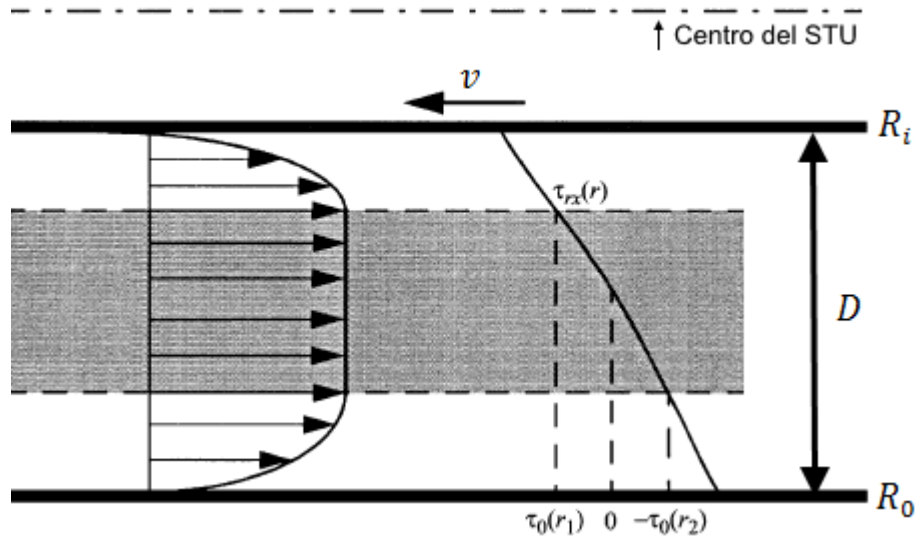


Figura 7.5: Fluido atravesando el orificio del STU [35]

Para transformar el modelo axial-simétrico en uno de platos paralelos hay que hacer una transformación geométrica para transformar la corona circular en un rectángulo como se ve en la Figura 7.6.

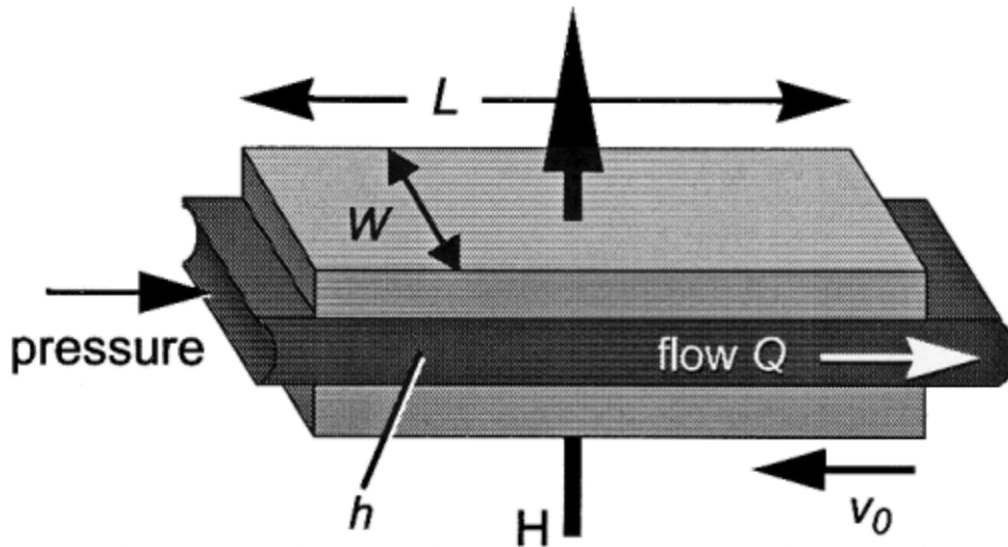


Figura 7.6: Modelo de platos paralelos [35]

En la Figura 7.6 se distinguen los términos L, h, D y w. Este último se considera como el ancho equivalente y es la media de las longitudes de circunferencia del pistón y la carcasa:

$$w = \pi \cdot (R_0 + R_i) \quad (7.14)$$

El modelo se basa en el empleo de una ecuación de quinto grado con términos adimensionales que no puede resolverse analíticamente pero si de forma numérica a través de programas especializados.

La ecuación del modelo es la siguiente:

$$3(\mathcal{P} - 2\mathcal{T})^2(\mathcal{P}^3 - (1 + 3\mathcal{T} - \mathcal{V}) \cdot \mathcal{P}^2 + 4\mathcal{T}^3) + \mathcal{T}\mathcal{V}^2\mathcal{P}^2 = 0 \quad (7.15)$$

dónde se distinguen:

- $\mathcal{P}$ : Término adimensional de presión:

$$\mathcal{P} = \frac{\pi \cdot d \cdot D \cdot v^3}{12 \cdot Q \cdot \eta} \frac{dp}{dx} = \frac{\pi \cdot d \cdot D^3}{12 \cdot A \cdot v_p \cdot \eta} \frac{dp}{dx} = \frac{d \cdot D}{3 \cdot v_p \cdot \eta} \frac{dp}{dx}$$

- $\mathcal{T}$ : Término adimensional de tensión:

$$\mathcal{T} = \frac{\pi \cdot d \cdot D^2 \cdot \tau_0}{12 \cdot Q \cdot \eta} = \frac{\pi \cdot d \cdot D^2 \cdot \tau_0}{12 \cdot A \cdot v_p \cdot \eta} = \frac{d \cdot \tau_0}{3 \cdot v_p \cdot \eta} = \frac{d \cdot \tau_0}{3 \cdot v_p} \cdot \dot{\gamma}$$

- $\mathcal{V}$ : Término adimensional de velocidad:

$$\mathcal{V} = -\frac{\pi \cdot d \cdot D \cdot v_p}{2Q} = -\frac{\pi \cdot d \cdot D \cdot v_p}{2 \cdot A_p \cdot v_p} = -\frac{2d}{D}$$

Resolviendo analíticamente la ecuación 7.15, Spencer ha deducido la expresión que da el valor de la fuerza asociada al fluido de trabajo [35]. Tras haber manipulado dicha expresión para expresarse según las variables de este caso, se obtiene:

$$F_\eta = \eta \cdot v_c \cdot \left(1 + \frac{w \cdot D}{2A_p}\right) \cdot \frac{12A_p^2 \cdot L}{w \cdot D^3} \cdot 10^{-6} = \eta[\text{Pa} \cdot \text{s}] \cdot v_p \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right] \cdot N_3 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{mm}}\right] \quad (7.16)$$

Donde  $N_3$  representa un parámetro geométrico, que calculado a partir de las cotas del STU (Anexo C) en mm ha resultado ser:

$$N_3 = 14,329 \frac{\text{m}^2}{\text{mm}}$$

No obstante, el modelo de Spencer se basa en que, además de la fuerza que va a ejercer el fluido, existe una fuerza intrínseca del dispositivo ( $F_f$ ), que es constante y conocida (parámetro de diseño). De esta forma la fuerza total queda tal y como se ve en la Figura 7.7, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$F = F_f + F_\eta \quad (7.17)$$

Esta fuerza ( $F_f$ ) está compuesta por el propio rozamiento del dispositivo en este caso, aunque también se podría incorporar una fuerza adicional mediante algún dispositivo auxiliar como un muelle.

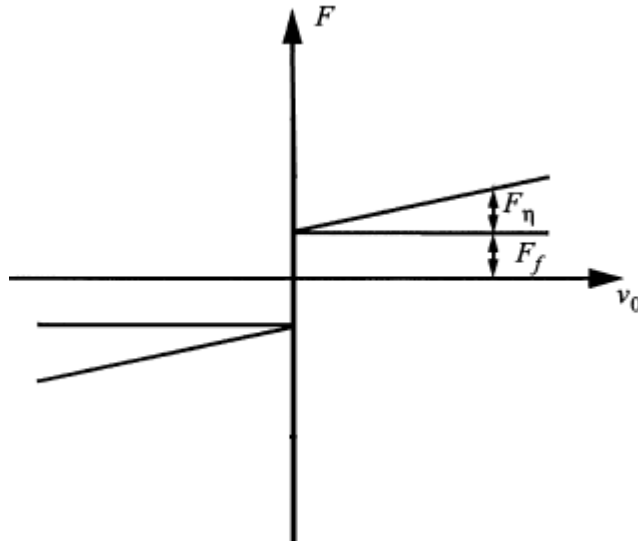


Figura 7.7: Composición de las fuerzas que actúan en el STU según el modelo de Spencer [35]



---

*Capítulo 8*  
*Resultados*

---

## Capítulo 8. Resultados

Los resultados obtenidos tanto de los ensayos reológicos como del STU se recopilan en este capítulo, a fin de poder ser comparados para el establecimiento de las conclusiones oportunas.

### 8.1. Ensayos reológicos

#### 8.1.1. Mezcla 1 (20%)

##### 8.1.1.1. Flow Ramp 3

La Figura 8.1 recoge la evolución de la viscosidad con la velocidad de cizalla obtenida experimentalmente.

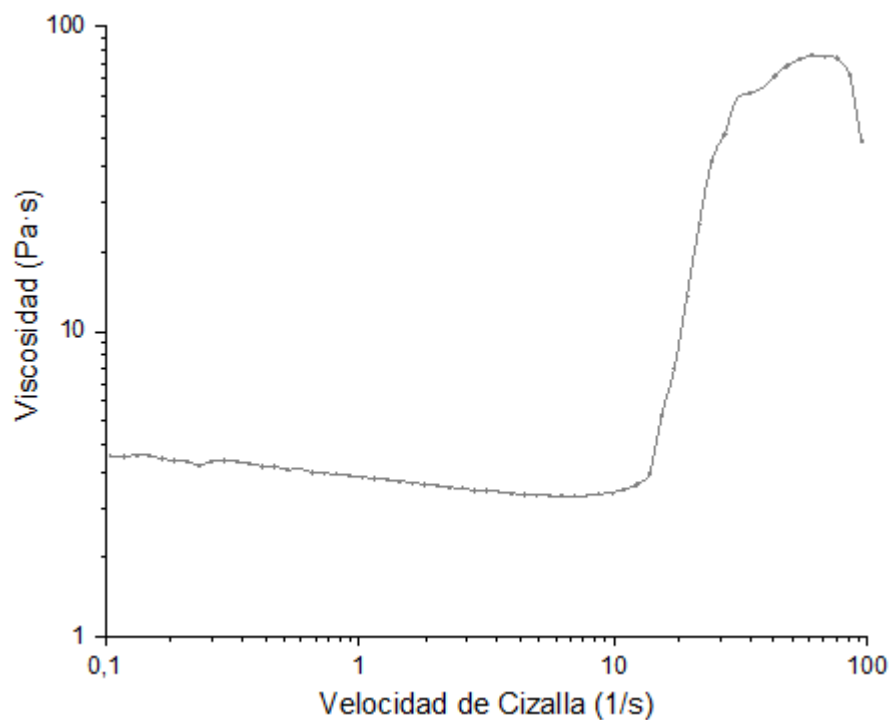


Figura 8.1: Viscosidad en función de la velocidad (en escala logarítmica) de la mezcla al 20%. Datos obtenidos experimentalmente

En la Figura 8.1 se distinguen las tres zonas diferenciadas descritas en el apartado 4.2.4, cuyos puntos de inicio se recogen en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Puntos de inicio de las regiones de comportamiento de la mezcla al 20%

	Viscosidad ( $\eta$ ) [Pa·s]	Velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) [ $s^{-1}$ ]
Región I	$\eta_0 = 3,91$	$\dot{\gamma}_0 = 0$
Región II	$\eta_c = 2,88$	$\dot{\gamma}_c = 7,02$
Región III	$\eta_{max} = 79,89$	$\dot{\gamma}_{max} = 60,40$

Por otro lado, la Figura 8.2 recoge la evolución del esfuerzo cortante con la velocidad de cizalla obtenida experimentalmente.

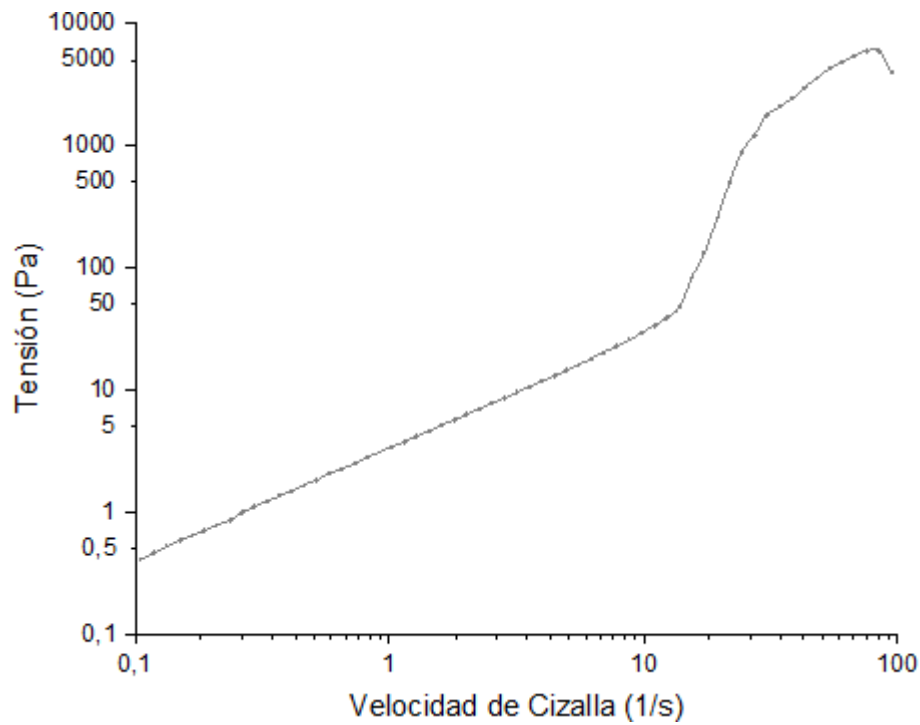


Figura 8.2: Esfuerzo cortante en función de la velocidad (en escala logarítmica) de la mezcla al 20%. Datos obtenidos experimentalmente

#### 8.1.1.1. Ensayos oscilatorios de frecuencia angular constante

La Figura 8.3 muestra los resultados de la viscosidad compleja en función de la velocidad para diferentes amplitudes de deformación (en %).

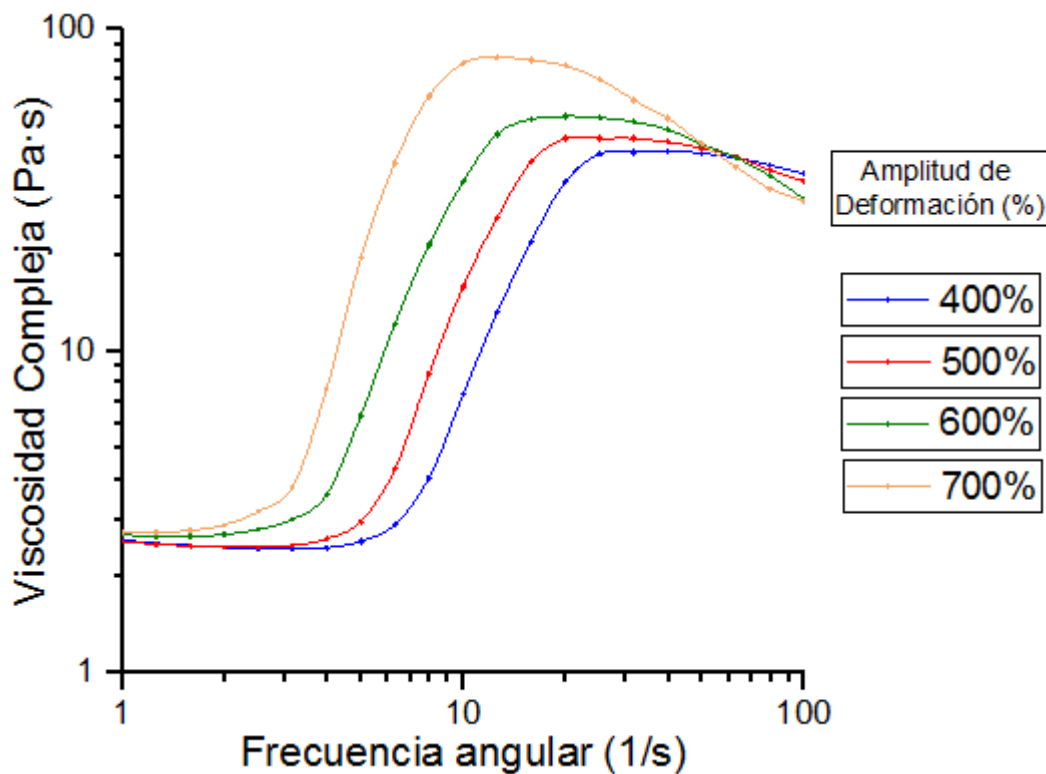


Figura 8.3: Viscosidad compleja en función de la velocidad angular (en escala logarítmica). Las diferentes curvas representan diferentes amplitudes de deformación.



En la Figura 8.3 se observa como a medida que se aumenta la amplitud de deformación también lo hace la viscosidad compleja.

La Figura 8.4 muestra los gráficos de los módulos de almacenamiento y pérdida para las cuatro amplitudes de deformación respectivamente. Se observa como ambos aumentan simultáneamente, aunque de forma más acentuada el de pérdida. No se aprecian grandes diferencias para las diferentes amplitudes de deformación.

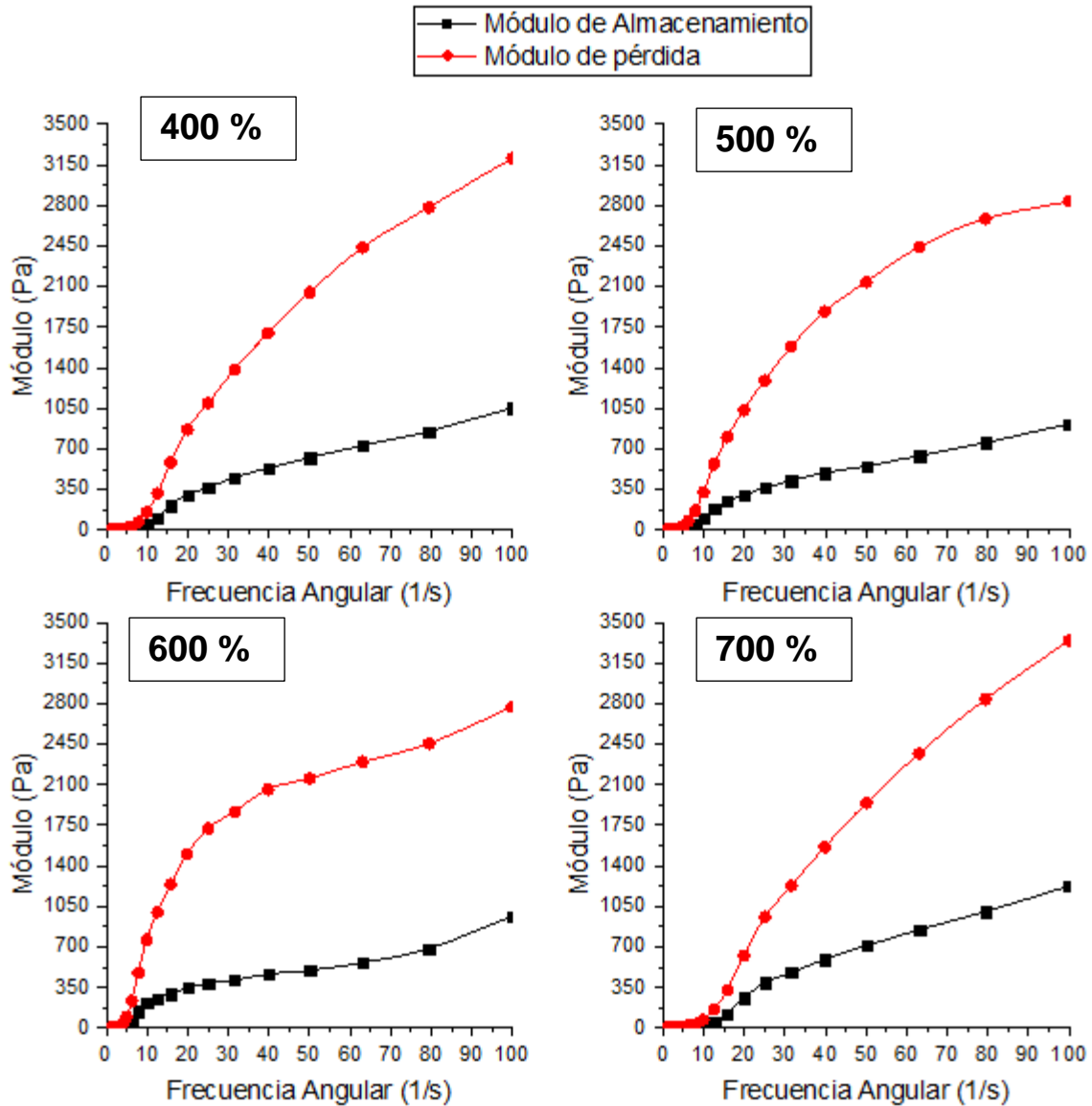
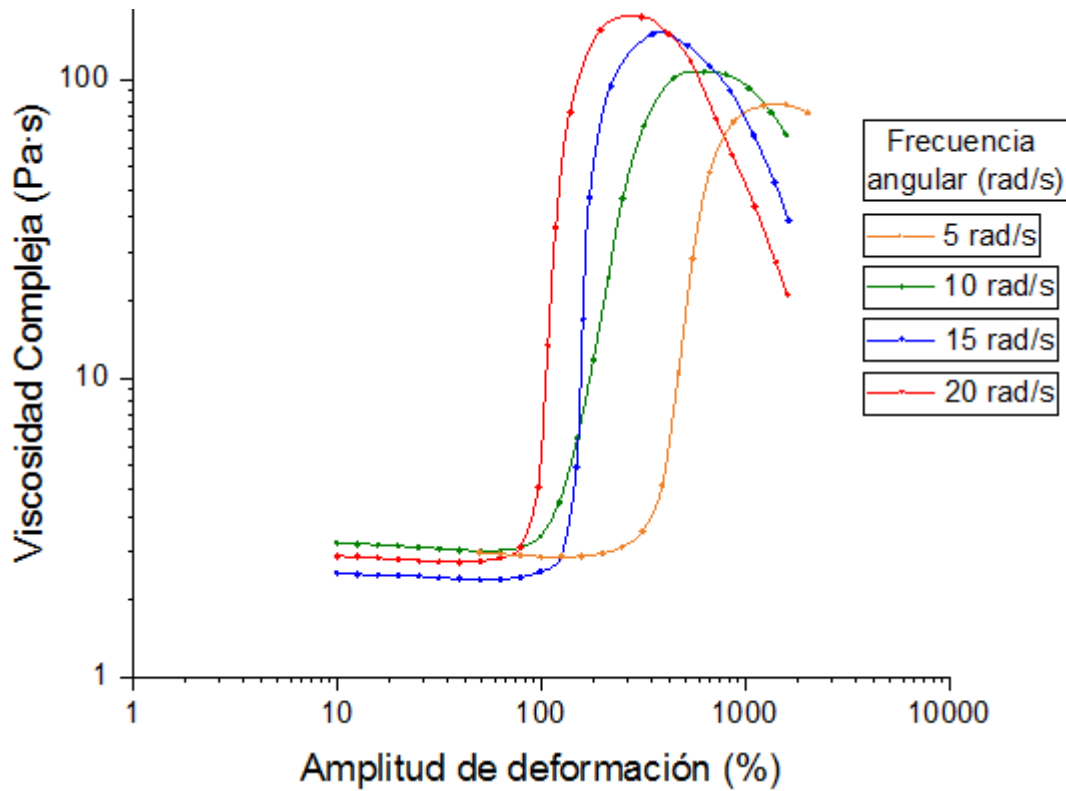


Figura 8.4: Módulos de pérdida y almacenamiento en función de la frecuencia angular para diferentes amplitudes de deformación. Datos obtenidos experimentalmente

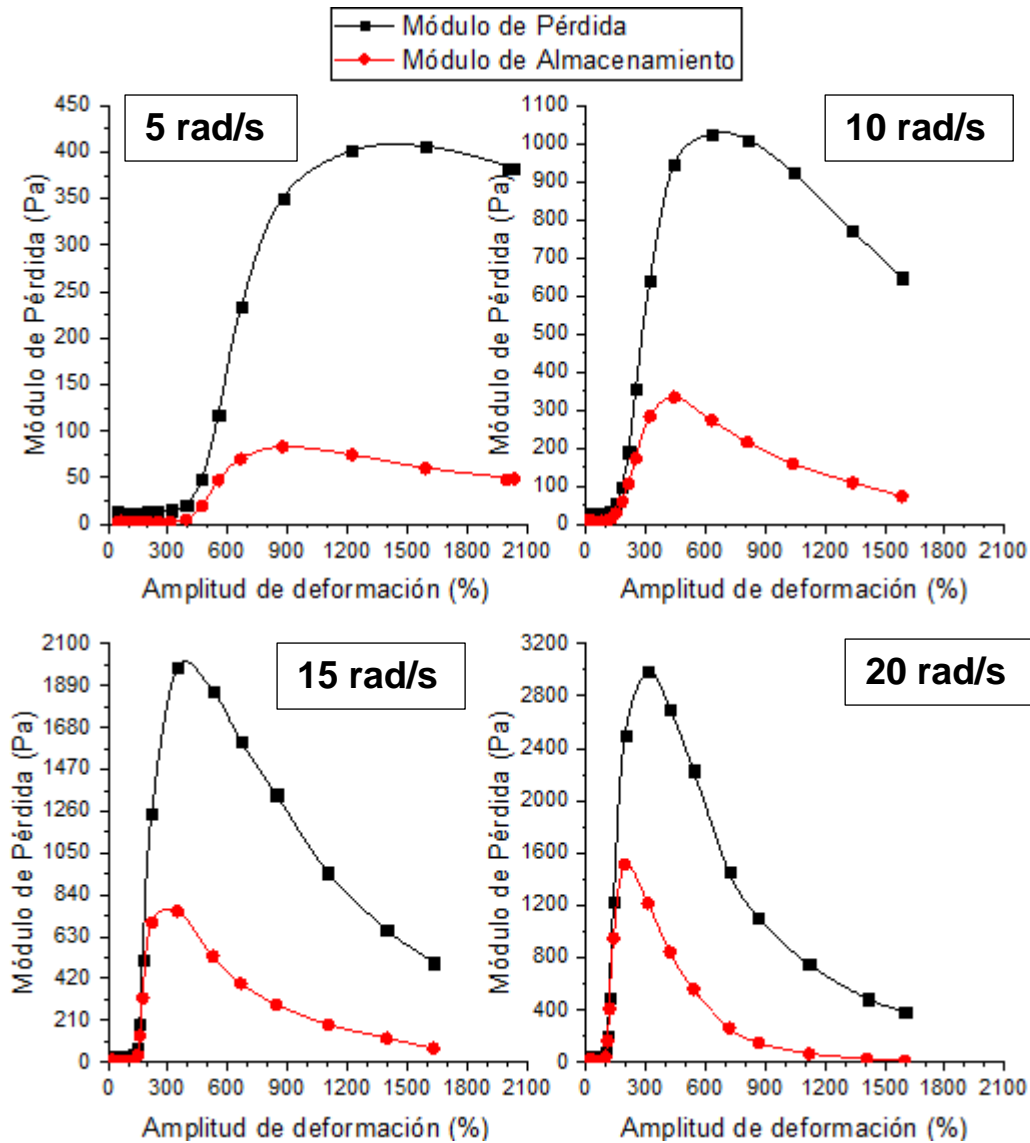
#### 8.1.1.2. Ensayos oscilatorios de amplitud de deformación constante

La Figura 8.5 muestra los resultados de la viscosidad compleja en función del esfuerzo cortante para diferentes velocidades angulares.



**Figura 8.5:** Viscosidad compleja en función de la deformación (en escala logarítmica). Las diferentes curvas representan velocidades de cizalla diferentes. Datos obtenidos experimentalmente.

La Figura 8.6 muestra los gráficos de los módulos de almacenamiento y pérdida para las cuatro frecuencias angulares respectivamente. Se observa como ambos aumentan simultáneamente, aunque de forma más acentuada el de pérdida. A su vez, se aprecia como a medida que aumenta la frecuencia angular más lo hacen los valores de los módulos, si bien la distancia entre ambos se reduce en términos relativos. Por otro lado, a medida que aumenta la frecuencia angular la forma de las curvas es más puntiaguda.



**Figura 8.6:** Módulos de pérdida y almacenamiento en función de la frecuencia angular para diferentes frecuencias angulares. Datos obtenidos experimentalmente

Con este ensayo también pueden determinarse las curvas tensión-deformación.

La Figura 8.7 muestra estas curvas para un punto de la región I de cada ensayo. La disparidad de los resultados se debe a las dificultades que tiene el reómetro para medir en estas condiciones, por lo que abundan los puntos sin sentido. Una vez descartados esos puntos las curvas si tienden a formar una elipse, salvo en el caso de 10 rad/s, donde los puntos están totalmente desperdigados.

La Figura 8.8 muestra estas curvas para un punto de la región II de cada ensayo. Ahora los resultados son más claros, pero se observa una clara distorsión de la circunferencia. Nuevamente la medición realizada a 10 rad/s reporta los datos más extraños y dispares.

La Figura 8.9 muestra estas curvas para un punto de la región III de cada ensayo. Estas mediciones se han realizado justo después de la zona de cambio de régimen, ya que después los datos se distorsionan mucho.

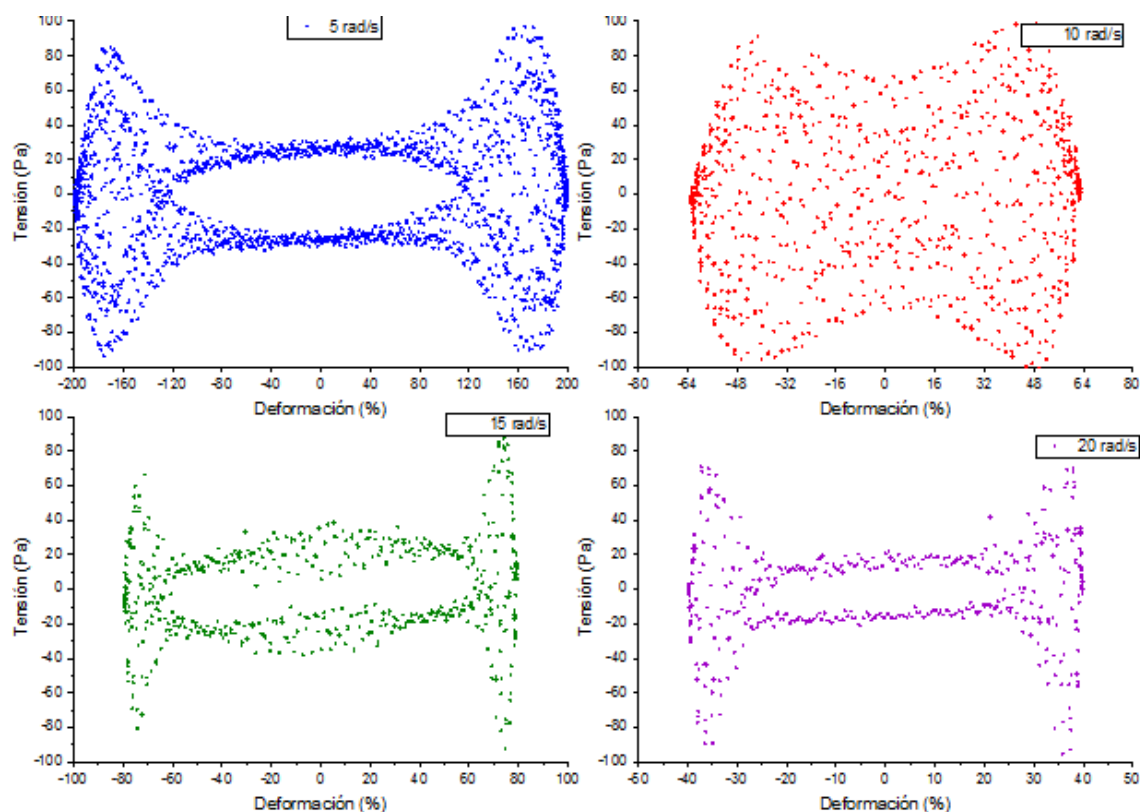


Figura 8.7: Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación bajas (región I del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente

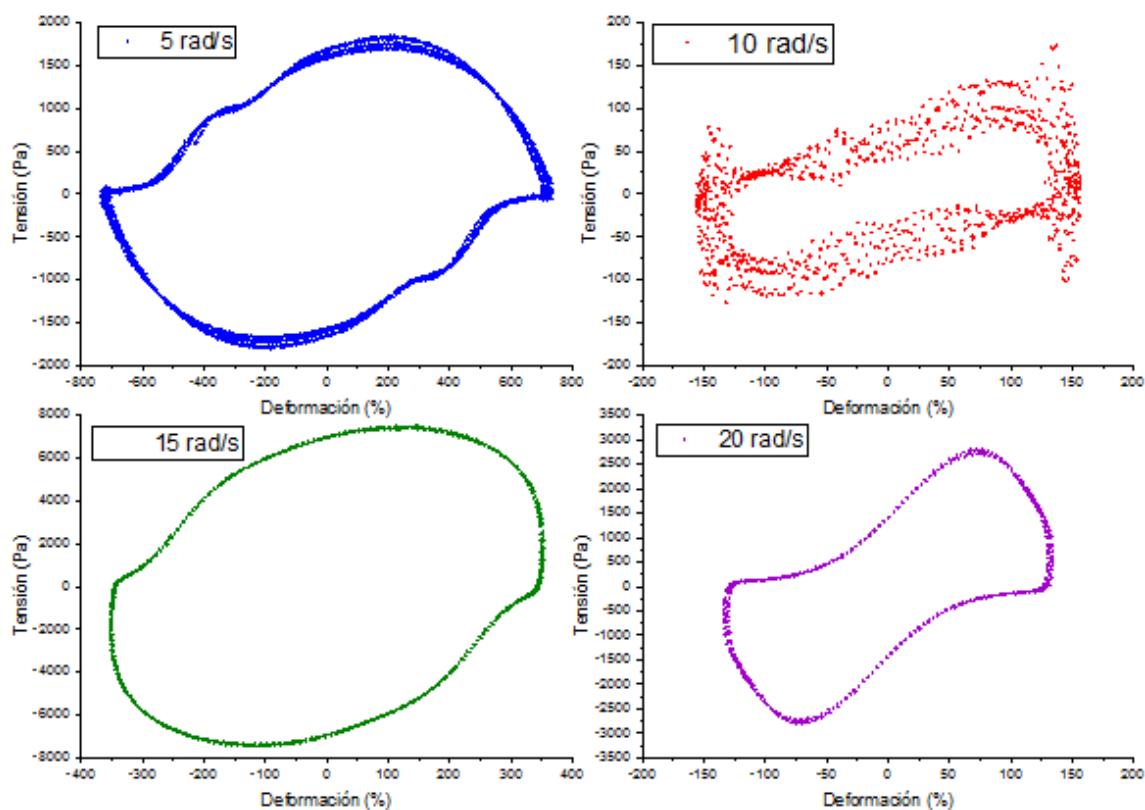
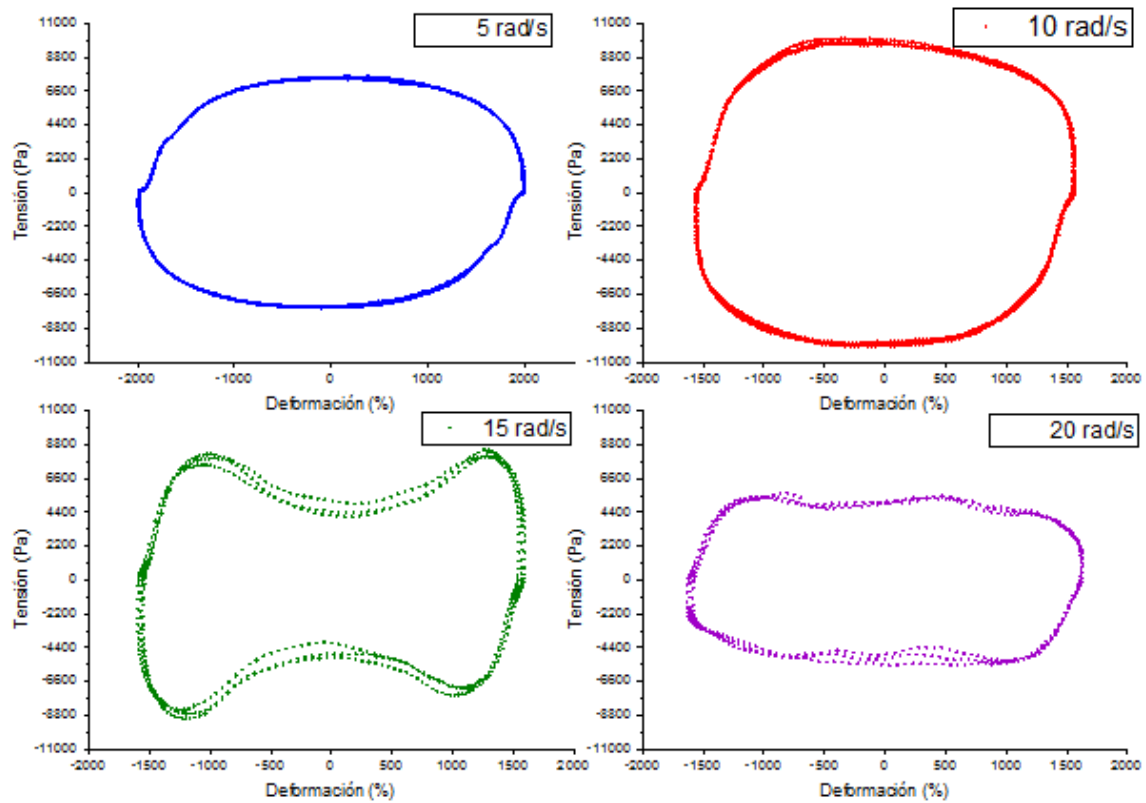


Figura 8.8: Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación medias (región II del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente



**Figura 8.9:** Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación medias (región II del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente

#### 8.1.1.3. Regla de Cox-Mertz modificada

Para la comprobación de la regla de Cox-Mertz modificada, se han obtenido las curvas de la Figura 8.11 (en base a los ensayos a deformación constante) y de la Figura 8.10 (en base a los ensayos de velocidad constante).

Por su continuidad con respecto a la curva del ensayo “Flow Ramp” se ha seleccionado la curva del ensayo a 700% para la regresión de la región III de comportamiento del fluido. Para ello se han tomado los valores de esa curva a partir de los datos de velocidad dinámica de 60,4; correspondientes al punto de cambio de comportamiento según la tabla.

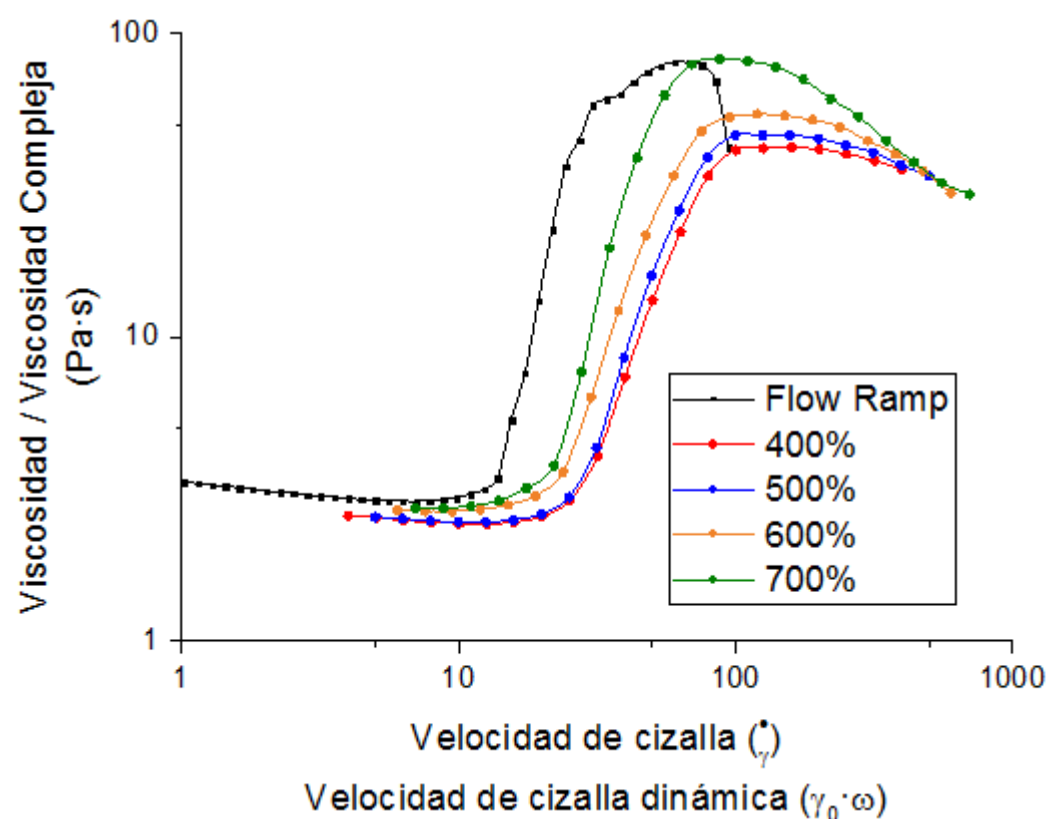


Figura 8.10: Comparativa de la curva del ensayo Flow Ramp con los oscilatorios a deformación constante. Escala logarítmica.

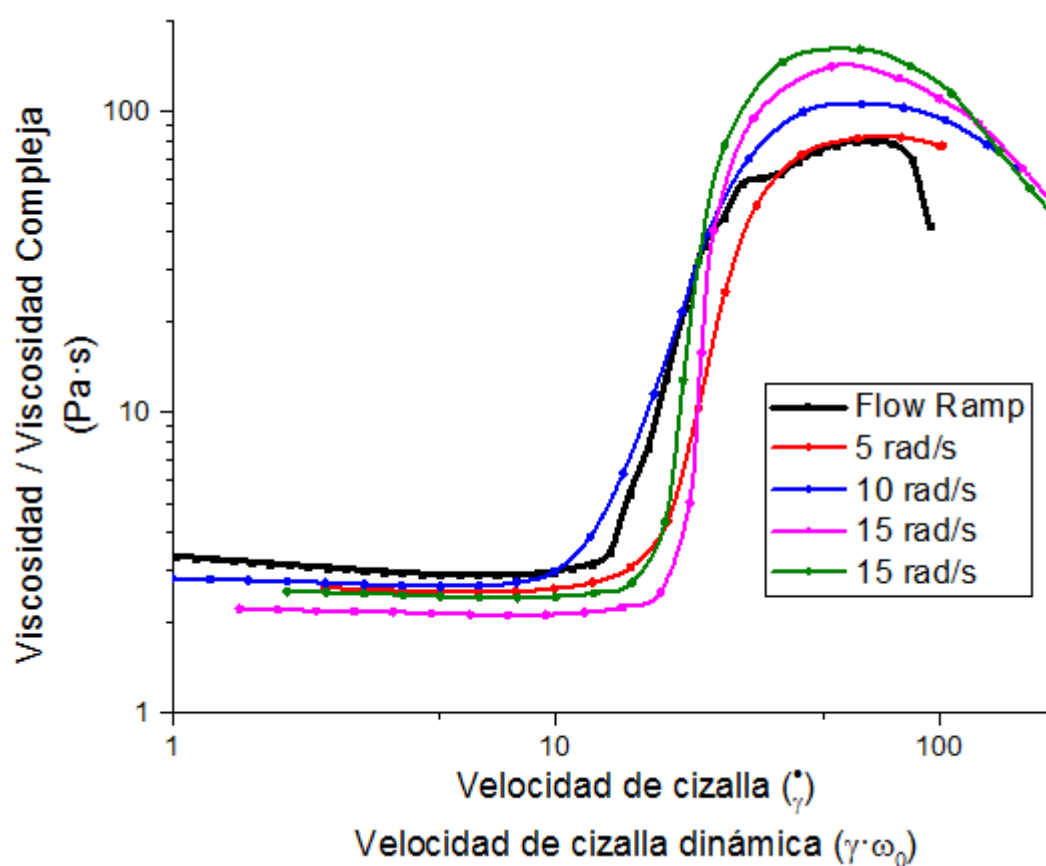


Figura 8.11: Comparativa de la curva del ensayo Flow Ramp con los oscilatorios a velocidad constante. Escala logarítmica.

#### 8.1.1.4. Caracterización del fluido

En base al modelo de Spencer descrito por la ecuación 3.12, se podría obtener la curva de comportamiento a partir de la regresión de la Figura 8.1. Si bien esto ha resultado apropiado para las regiones I y II de comportamiento, los datos obtenidos para la región III no eran muy precisos (por las dificultades de medición del reómetro en esa zona) por lo en su lugar la región III se ha calculado a partir de los datos de la Figura 8.5 a 700%, dando validez a la regla de Cox-Mertz modificada.

Ajustando la curva con MATLAB (Curve Fitting Tool) a la ecuación 3.12, con los límites de la Tabla 8.1, la siguiente expresión:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \begin{cases} 2,88 + \frac{1,03}{1 + \left[8,465 \cdot \frac{\dot{\gamma}^2}{7,02 - \dot{\gamma}}\right]^{0,6704}} & \forall \dot{\gamma} \leq 7,02 \\ 79,89 - \frac{77,01}{1 + \left[1,633 \cdot \frac{\dot{\gamma} - 7,02}{60,4 - \dot{\gamma}}\right]^{2,175}} & \forall 7,02 \leq \dot{\gamma} \leq 60,4 \\ \frac{79,89}{1 + [5,473 \cdot 10^{-3} \cdot (\dot{\gamma} - 60,4)]^{1,165}} & \forall 60,4 \leq \dot{\gamma} \end{cases} \quad (8.1)$$

La representación gráfica de la ecuación se muestra en la Figura 8.12, donde se comparan los valores experimentales con los ajustados y se indican las tres regiones del comportamiento del fluido.

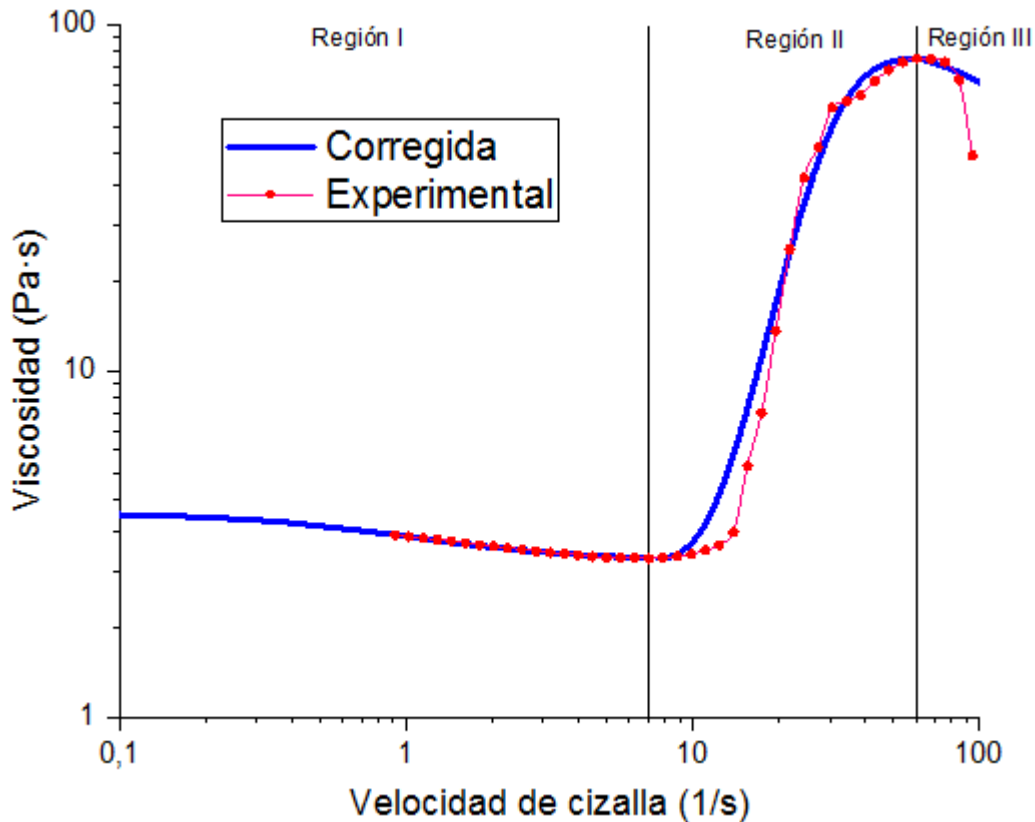


Figura 8.12: Representación de la viscosidad en función de la velocidad (en escala logarítmica) en base a los datos (rojo) y con el modelo de Cross (azul) de la mezcla al 20%

Dada la relación entre esfuerzo cortante y viscosidad, se puede hallar una función para el primero de forma inmediata:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \left[ \frac{2,88 + \frac{1,03}{1 + \left[ 8,465 \cdot \frac{\dot{\gamma}^2}{7,02 - \dot{\gamma}} \right]^{0,6704}}}{1} \right] \cdot \dot{\gamma} & \forall \dot{\gamma} \leq 7,02 \\ \left[ \frac{79,89 - \frac{77,01}{1 + \left[ 1,633 \cdot \frac{\dot{\gamma} - 7,02}{60,4 - \dot{\gamma}} \right]^{2,175}}}{1} \right] \cdot \dot{\gamma} & \forall 7,02 \leq \dot{\gamma} \leq 60,4 \\ \left[ \frac{79,89}{1 + [5,473 \cdot 10^{-3} \cdot (\dot{\gamma} - 60,4)]^{1,165}} \right] \cdot \dot{\gamma} & \forall 60,4 \leq \dot{\gamma} \end{cases} \quad (8.2)$$

La Figura 8.13 muestra la comparación de los datos de tensión tangencial obtenidos experimentalmente con la curva de regresión, al igual que con la viscosidad, cuando se alcanza la región III de comportamiento la curva de regresión se desprende de los datos.

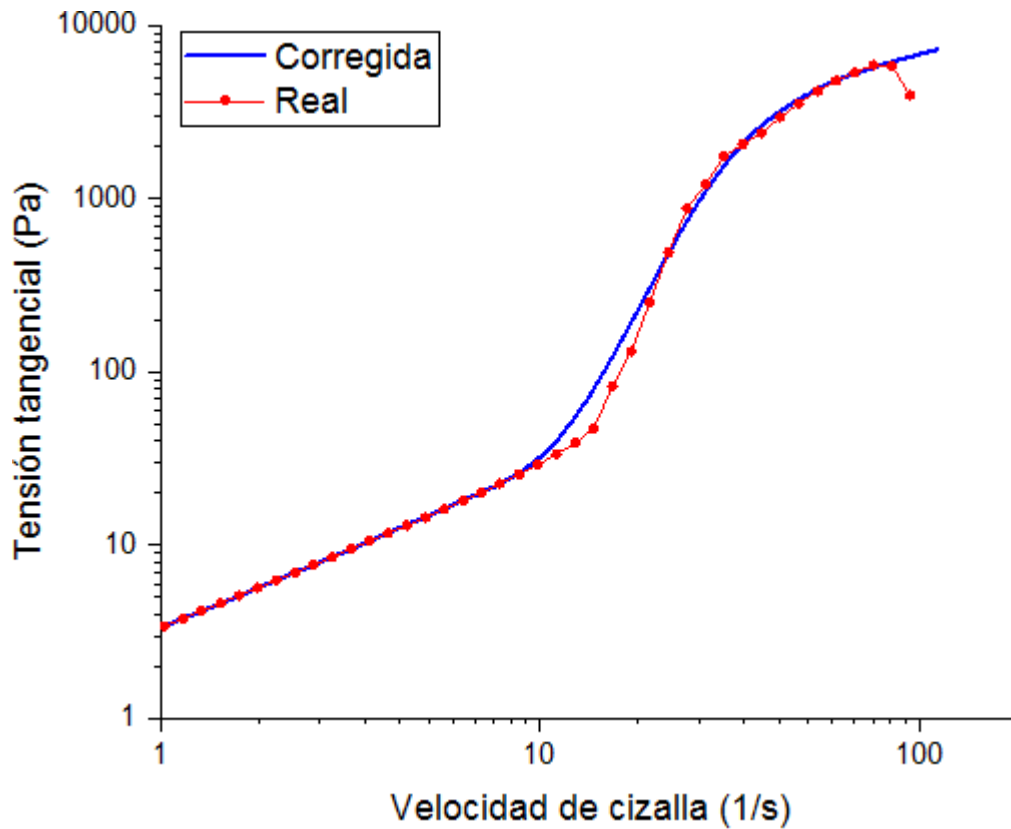


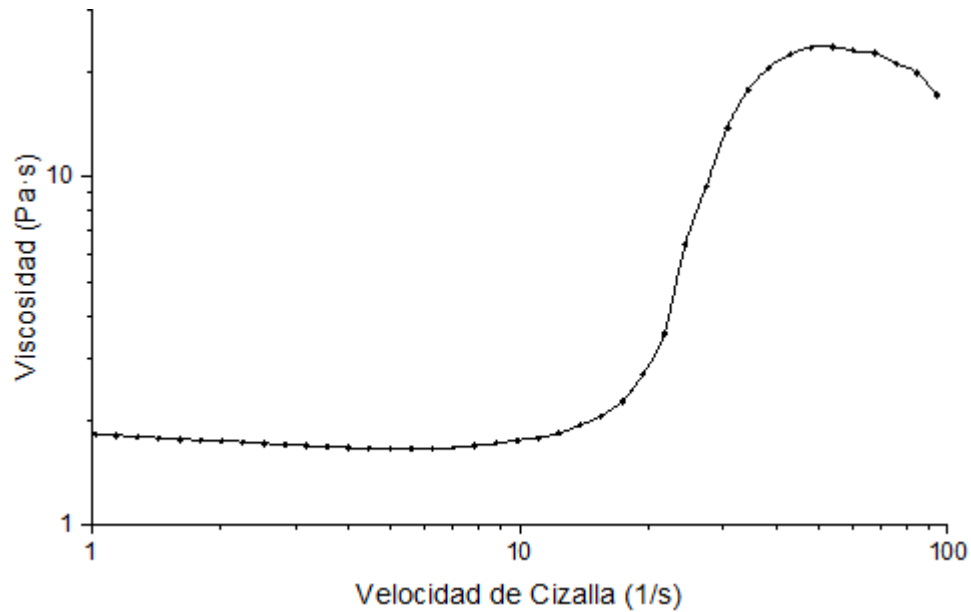
Figura 8.13: Representación del esfuerzo cortante en función de la velocidad (en escala logarítmica) en base a los datos (rojo) y con el modelo de Cross (azul) de la mezcla al 20%



### 8.1.2. Mezcla 2 (15%)

#### 8.1.2.1. Flow Ramp 3

La Figura 8.14 recoge la evolución de la viscosidad con la velocidad de cizalla:



**Figura 8.14:** Representación de la viscosidad en función de la velocidad (en escala logarítmica) de la mezcla al 15%

Al igual que en el caso anterior, se distinguen las tres zonas. Los puntos de inicio de cada región se recogen en la Tabla 8.2.

**Tabla 8.2:** Puntos de cambio de comportamiento de la mezcla al 15%

	Viscosidad ( $\eta$ ) [Pa·s]	Velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) [ $s^{-1}$ ]
Región I	$\eta_0 = 2,4$	$\dot{\gamma}_0 = 0$
Región II	$\eta_c = 1,65$	$\dot{\gamma}_c = 5,6$
Región III	$\eta_{max} = 23,67$	$\dot{\gamma}_{max} = 53,95$

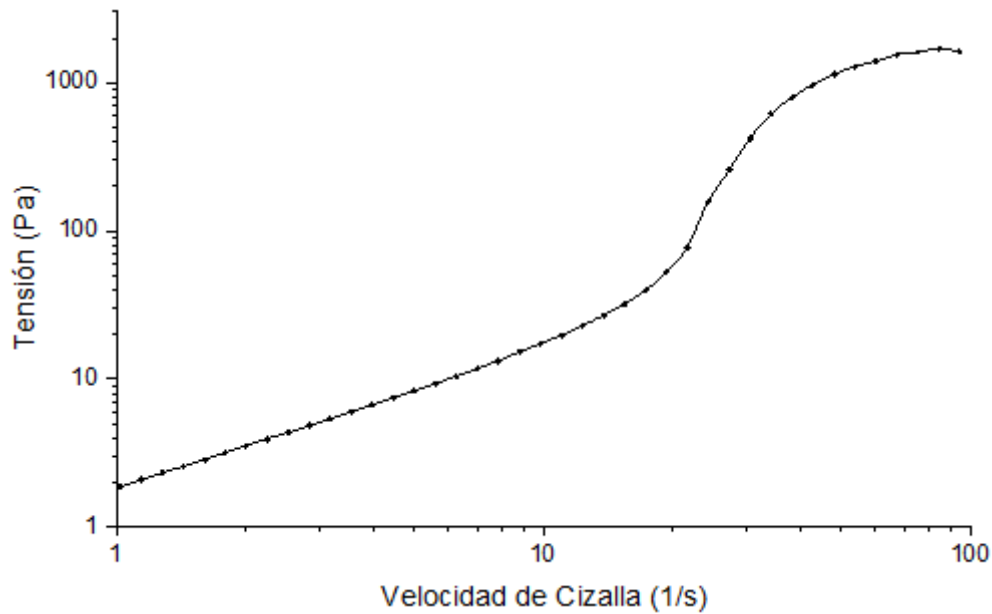


Figura 8.15: Representación del esfuerzo cortante en función de la velocidad (en escala logarítmica) de la mezcla al 15%

#### 8.1.2.2. Ensayos oscilatorios de frecuencia angular constante

La Figura 8.16 muestra los resultados de la viscosidad compleja en función de la velocidad de la velocidad angular para diferentes esfuerzos cortantes.

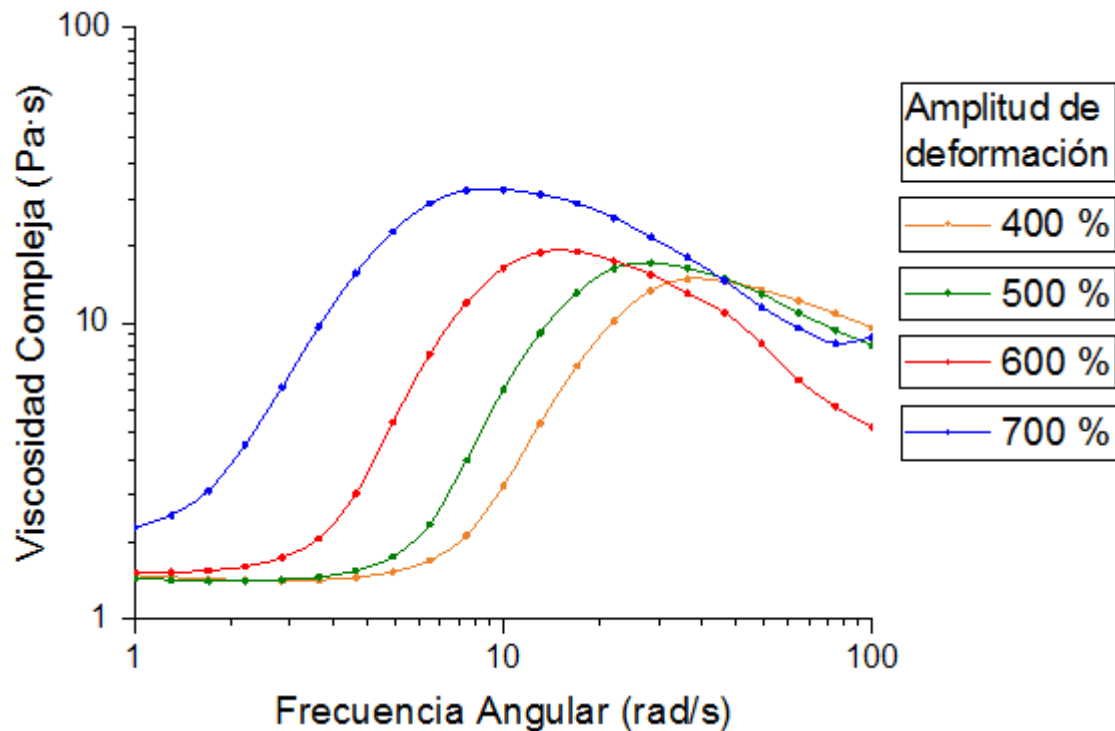


Figura 8.16: Viscosidad compleja en función de la velocidad angular (en escala logarítmica). Las diferentes curvas representan esfuerzos cortantes diferentes.

En la Figura 8.16 se observa como a medida que se aumenta la amplitud de deformación también lo hace la viscosidad compleja.

La Figura 8.17 muestra los gráficos de los módulos de almacenamiento y pérdida para las cuatro amplitudes de deformación respectivamente. Se observa como ambos aumentan simultáneamente, aunque de forma más acentuada el de pérdida. No se aprecian grandes diferencias para las diferentes amplitudes de deformación.

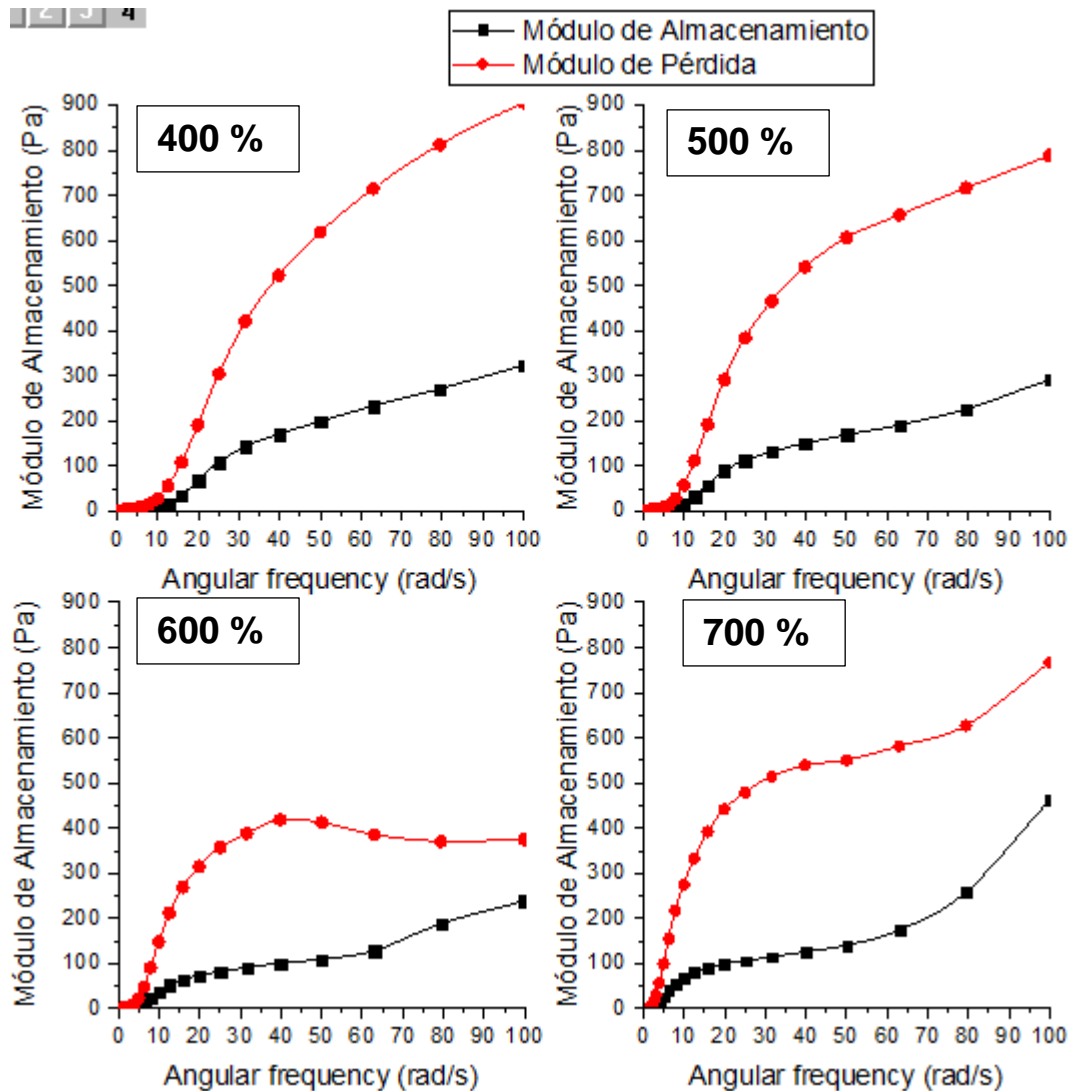
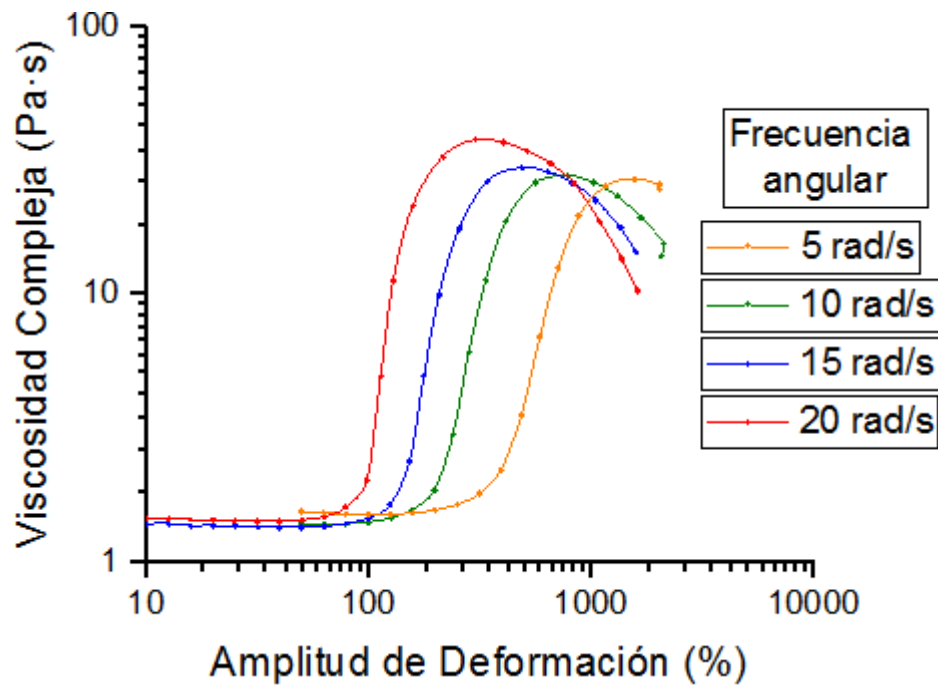


Figura 8.17: Módulos de pérdida y almacenamiento en función de la frecuencia angular para diferentes amplitudes de deformación. Datos obtenidos experimentalmente

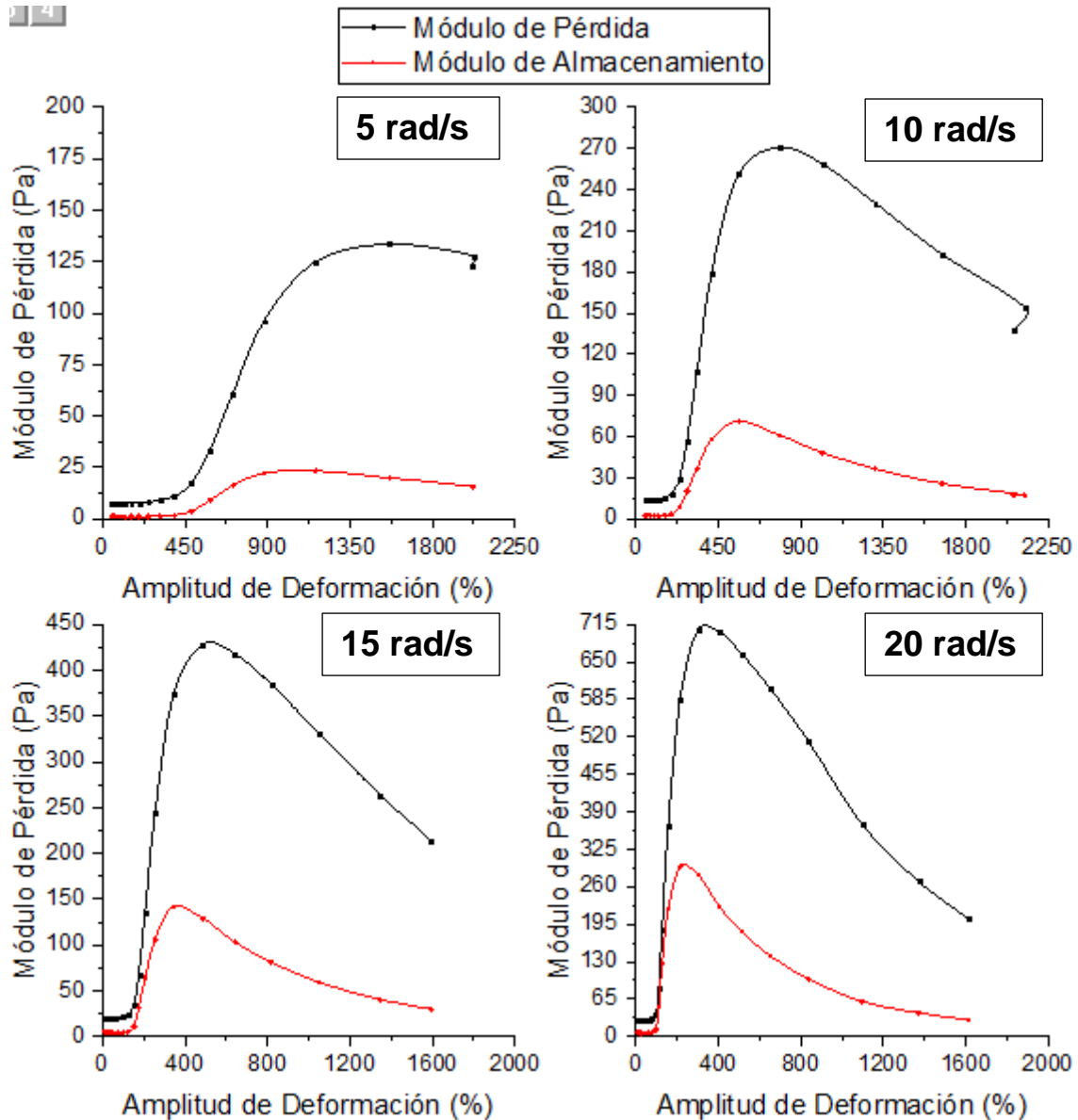
#### 8.1.2.1. Ensayos oscilatorios de amplitud de deformación constante

La Figura 8.18 muestra los resultados de la viscosidad compleja en función del esfuerzo cortante para diferentes velocidades angulares.



**Figura 8.18:** Viscosidad compleja en función de la deformación (en escala logarítmica). Las diferentes curvas representan velocidades de cizalla diferentes. Datos obtenidos experimentalmente.

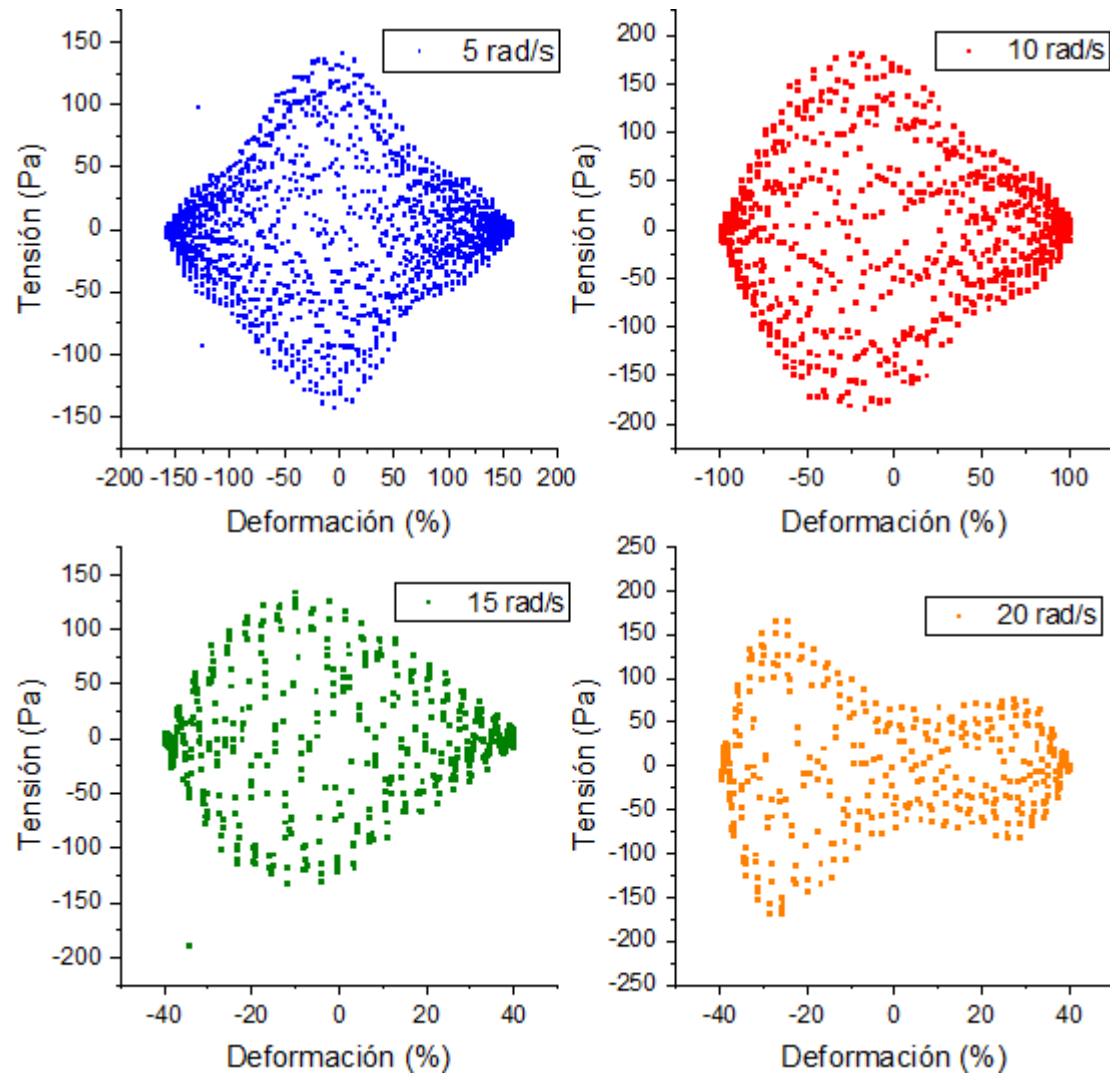
La Figura 8.19 muestra los gráficos de los módulos de almacenamiento y pérdida para las cuatro frecuencias angulares respectivamente. Se observa como ambos aumentan simultáneamente, aunque de forma más acentuada el de pérdida. A su vez, se aprecia como a medida que aumenta la frecuencia angular más lo hacen los valores de los módulos, si bien la distancia entre ambos se reduce en términos relativos. Por otro lado, a medida que aumenta la frecuencia angular la forma de las curvas es más puntiaguda.



**Figura 8.19: Módulos de pérdida y almacenamiento en función de la frecuencia angular para diferentes frecuencias angulares. Datos obtenidos experimentalmente**

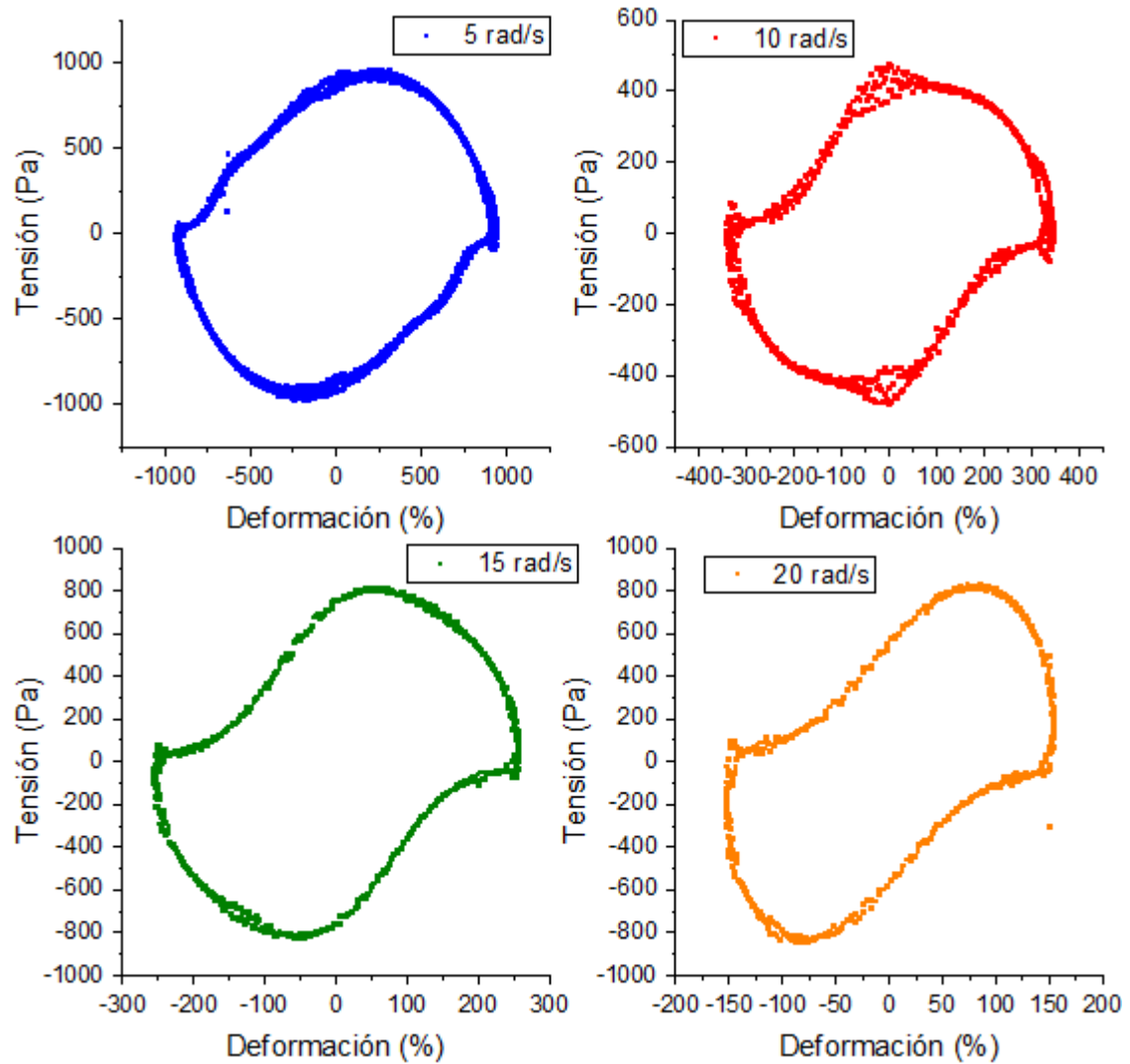
Con este ensayo también pueden determinarse las curvas de linealidad de la deformación.

La Figura 8.20 muestra estas curvas para un punto de la región I de cada ensayo. La disparidad de los resultados se debe a las dificultades que tiene el reómetro para medir en estas condiciones, por lo que abundan los puntos sin sentido. Una vez descartados esos puntos las curvas si tienden a formar una elipse, salvo en el caso de 10 rad/s, donde los puntos están totalmente desperdigados.



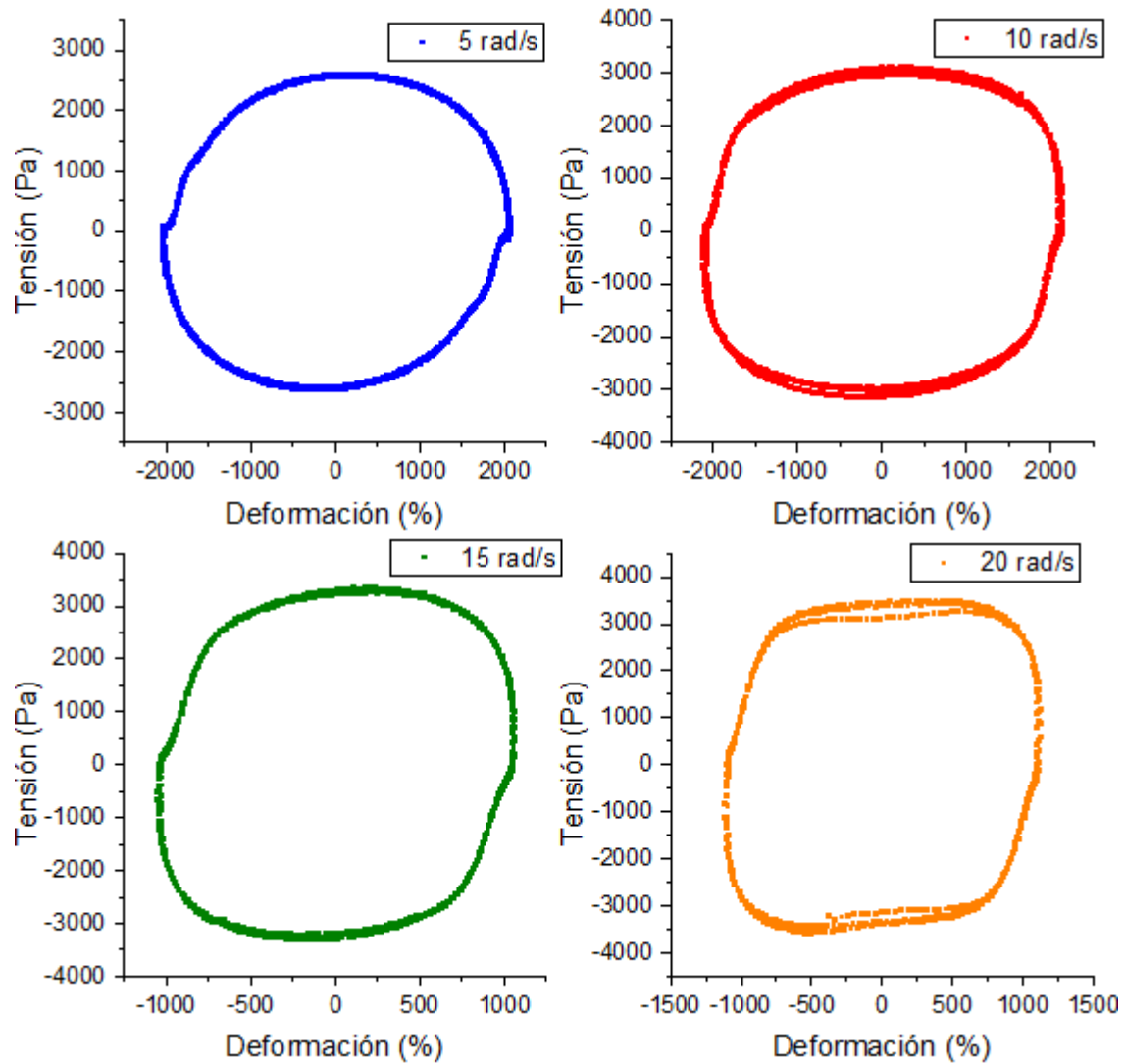
**Figura 8.20:** Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación bajas (región I del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente

La Figura 8.21 muestra estas curvas para un punto de la región II de cada ensayo. Ahora los resultados son más claros, pero se observa una clara distorsión de la circunferencia. Nuevamente la medición realizada a 10 rad/s reporta los datos más extraños y dispares.



**Figura 8.21: Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación medias (región II del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente**

La Figura 8.22 muestra estas curvas para un punto de la región III de cada ensayo. Estas mediciones se han realizado justo después de la zona de cambio de régimen, ya que después los datos se distorsionan mucho.



**Figura 8.22:** Curvas tensión-deformación para para amplitudes de deformación medias (región II del comportamiento). Datos obtenidos experimentalmente

#### 8.1.2.2. Regla de Cox-Mertz modificada

Para la comprobación de la regla de Cox-Mertz modificada, se han obtenido las curvas de la Figura 8.11 (en base a los ensayos a deformación constante) y de la Figura 8.10 (en base a los ensayos de velocidad constante).

Por su continuidad con respecto a la curva del ensayo “Flow Ramp” se ha seleccionado la curva del ensayo a 700% para la regresión de la región III de comportamiento del fluido. Para ello se han tomado los valores de esa curva a partir de los datos de velocidad dinámica de 60,4; correspondientes al punto de cambio de comportamiento según la tabla.



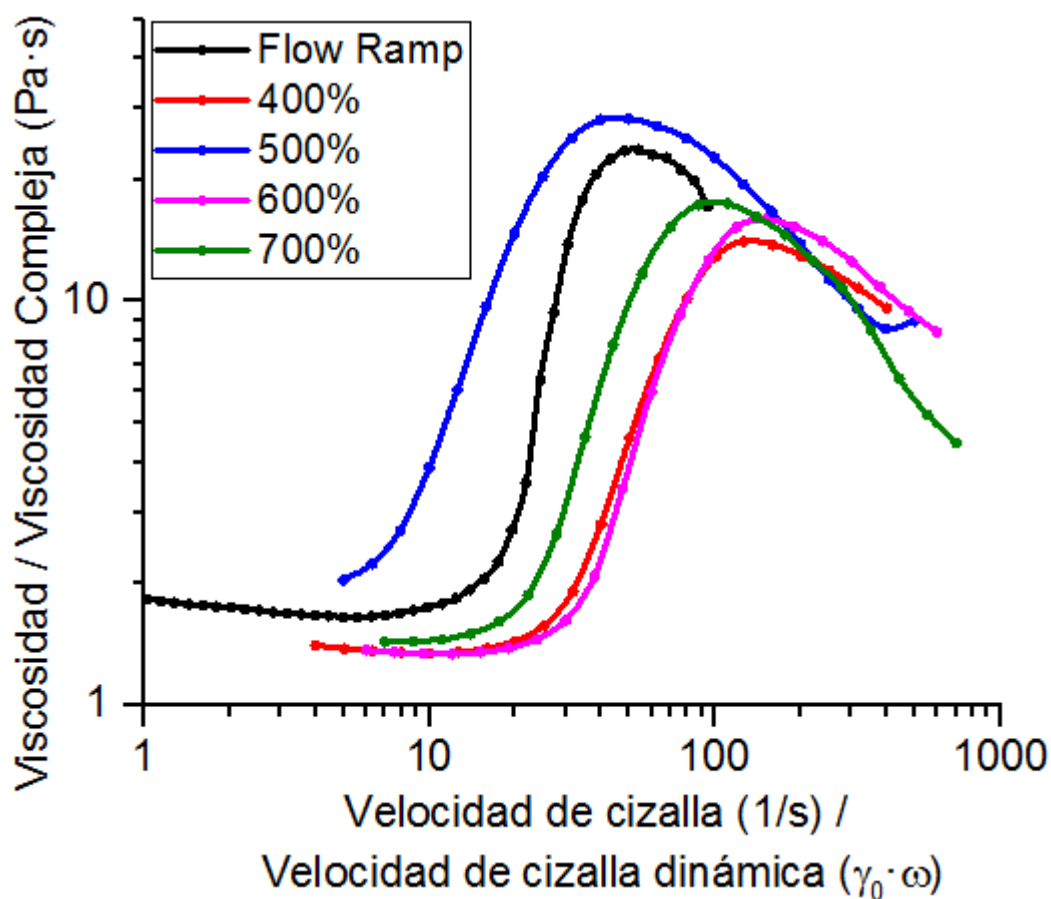


Figura 8.23: Comparativa de la curva del ensayo Flow Ramp con los oscilatorios a deformación constante. Escala logarítmica.

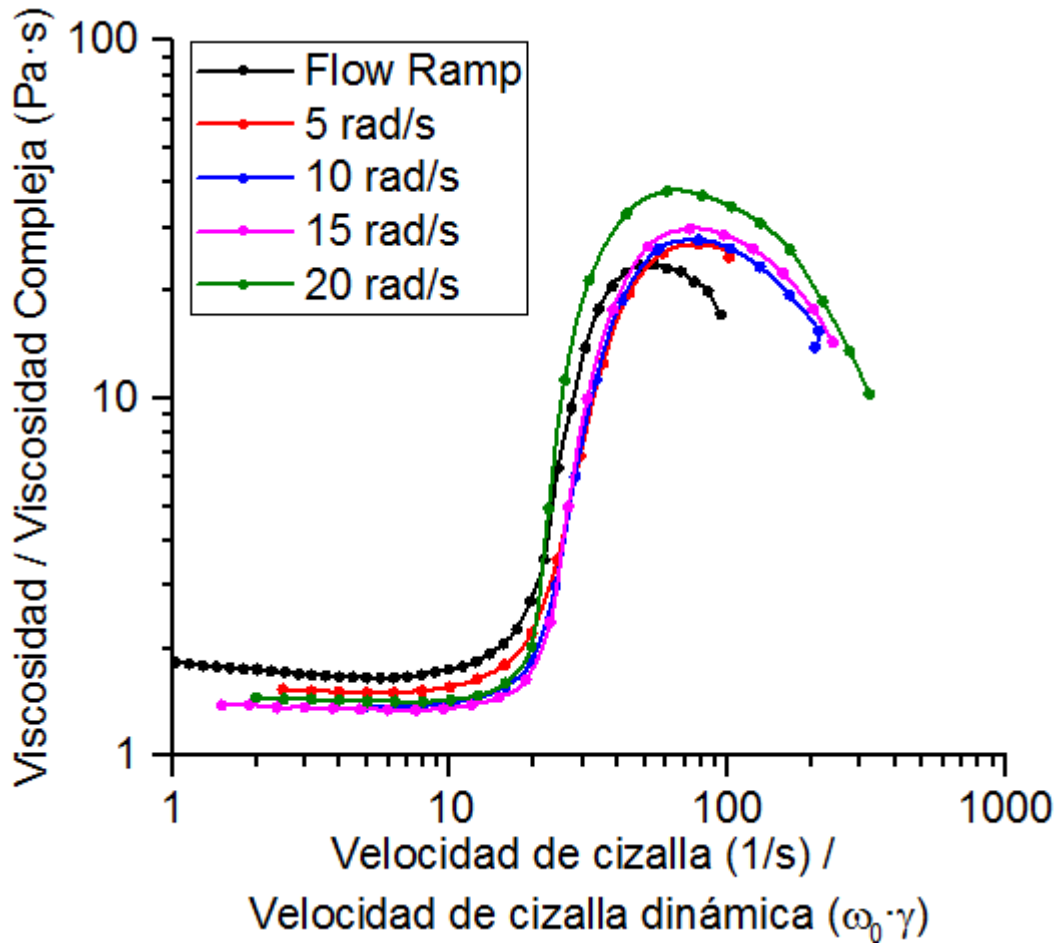


Figura 8.24: Comparativa de la curva del ensayo Flow Ramp con los oscilatorios a velocidad constante. Escala logarítmica.

#### 8.1.2.3. Caracterización del fluido

Dado que la regla de Cox-Mertz modificada no se cumple, ha habido que combinar las gráficas de viscosidad frente a la velocidad de cizalla (Figura 8.14) y la de viscosidad compleja frente a velocidad de cizalla dinámica (en la Figura 8.24) para frecuencia angular constante de 15 rad/s, de forma que primero se usan los datos experimentales, y a partir del punto en que se cortan, la curva de velocidad dinámica. Esto lleva a modificar los límites de las regiones de comportamiento de la Tabla 8.2, que ahora son los que se muestran en la Tabla 8.3.

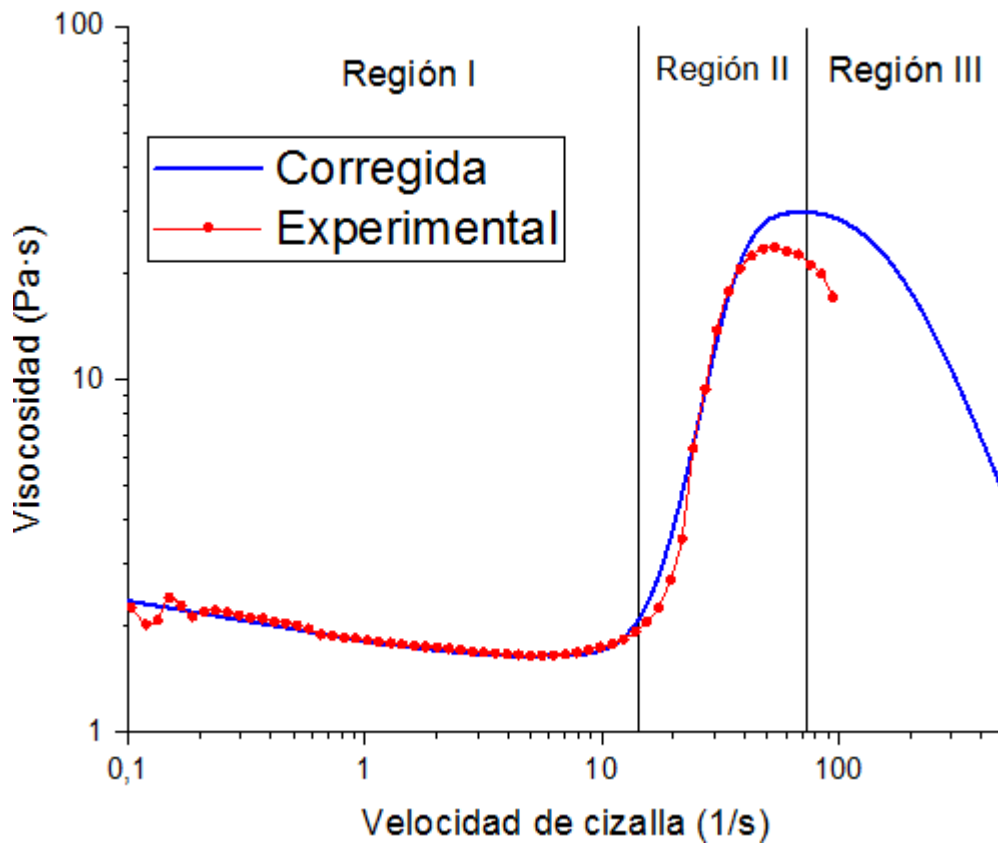
Tabla 8.3: Puntos de cambio de comportamiento (corregidos) de la mezcla al 15%

	Viscosidad ( $\eta$ ) [Pa·s]	Velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) [ $s^{-1}$ ]
Región I	$\eta_0 = 2,4$	$\dot{\gamma}_0 = 0$
Región II	$\eta_c = 1,65$	$\dot{\gamma}_c = 5,6$
Región III	$\eta_{max} = 29,79$	$\dot{\gamma}_{max} = 73,03$

A partir de los límites de la y aproximando con MATLAB a la ecuación, se obtiene la siguiente función a trozos:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \begin{cases} 1,65 + \frac{0,75}{1 + \left[26,29 \cdot \frac{\dot{\gamma}^2}{5,6 - \dot{\gamma}}\right]^{0,5869}} & \forall \dot{\gamma} \leq 5,6 \\ 29,79 - \frac{28,14}{1 + \left[1,45 \cdot \frac{\dot{\gamma} - 5,6}{73,03 - \dot{\gamma}}\right]^{2,698}} & \forall 5,6 \leq \dot{\gamma} \leq 73,03 \\ \frac{29,79}{1 + [0,00621 \cdot (\dot{\gamma} - 73,03)]^{1,714}} & \forall 73,03 \leq \dot{\gamma} \end{cases} \quad (8.3)$$

La Figura 8.25 muestra la representación gráfica de la viscosidad frente a la velocidad de cizalla, tanto experimental como la estimada con MATLAB. En ella también se indican las tres regiones del comportamiento del fluido.



**Figura 8.25:** Representación de la viscosidad en función de la velocidad (en escala logarítmica) en base a los datos (rojo) y con el modelo de Cross (azul) de la mezcla al 15%

Por otro lado, la Figura 8.26 recoge la evolución del esfuerzo con la velocidad de cizalla. Dada la relación entre esfuerzo cortante y viscosidad, se puede hallar una función para la primera de forma inmediata:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \left[ 1,65 + \frac{0,75}{1 + \left[ 26,29 \cdot \frac{\dot{\gamma}^2}{5,6 - \dot{\gamma}} \right]^{0,5869}} \right] \cdot \dot{\gamma} & \forall \dot{\gamma} \leq 5,6 \\ \left[ 29,79 - \frac{28,14}{1 + \left[ 1,45 \cdot \frac{\dot{\gamma} - 5,6}{73,03 - \dot{\gamma}} \right]^{2,698}} \right] \cdot \dot{\gamma} & \forall 5,6 \leq \dot{\gamma} \leq 73,03 \\ \left[ \frac{29,79}{1 + [0,00621 \cdot (\dot{\gamma} - 73,03)]^{1,714}} \right] \cdot \dot{\gamma} & \forall 73,03 \leq \dot{\gamma} \end{cases} \quad (8.4)$$

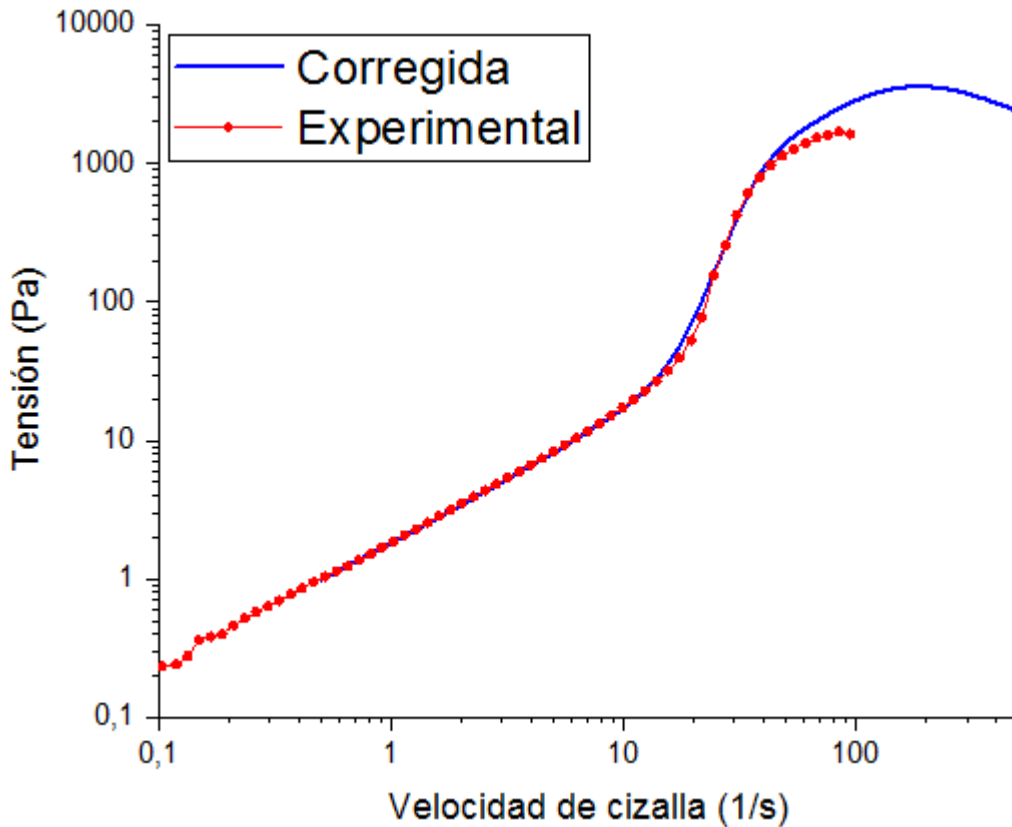


Figura 8.26: Representación del esfuerzo cortante en función de la velocidad (en escala logarítmica) en base a los datos (rojo) y con el modelo de Cross (azul) de la mezcla al 15%

### 8.1.1. PPG

Sobre la muestra de PPG se han realizado dos ensayos Flow Ramp, de los que se han obtenido resultados muy similares, a diferencia de lo sucedido con las muestras de STF. La Figura 8.27 muestra la viscosidad y la Figura 8.28, el esfuerzo cortante con respecto al tiempo respectivamente.

La Figura 8.27 muestra como la viscosidad permanece inalterada con el paso del tiempo, con un valor promedio de 0,245 Pa·s. Se observa que para bajas velocidades de deformación existe una gran disparidad de los datos que se debe a la dificultad del reómetro para medir en esas condiciones, por lo que los resultados obtenidos para menos de 5 s<sup>-1</sup> pueden ser descartados.

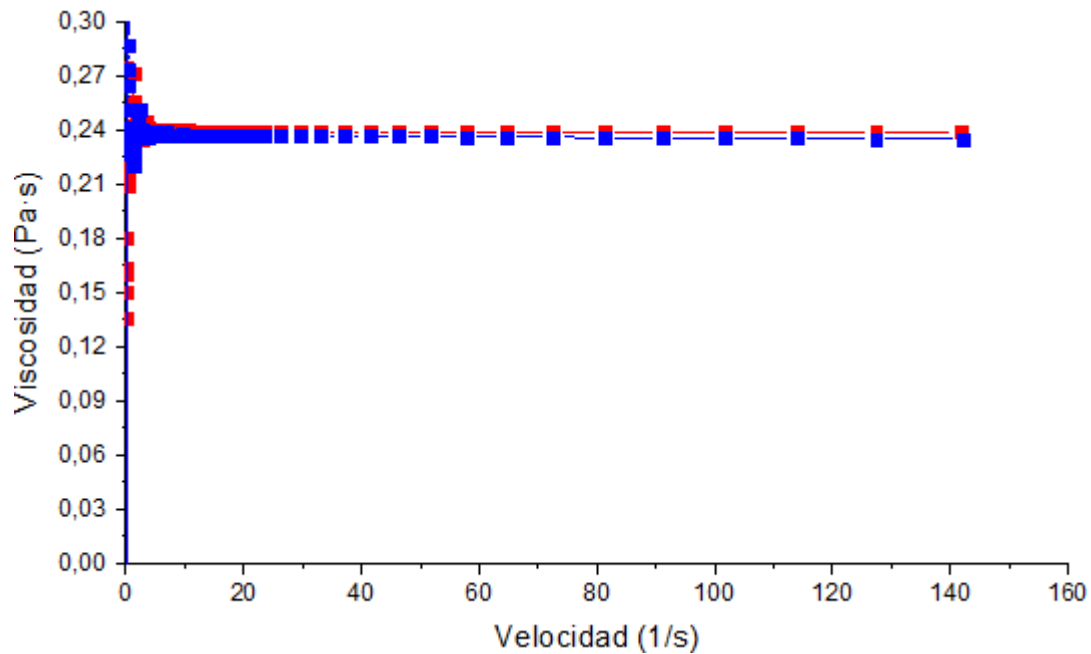


Figura 8.27: Viscosidad en función de la deformación del PPG obtenida experimentalmente

La Figura 8.28 muestra una evolución lineal del esfuerzo con la deformación, que de acuerdo con la regresión lineal realizada con MATLAB se corresponde con las siguientes ecuaciones, para el primer ensayo y el segundo respectivamente:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \eta \cdot \dot{\gamma} = 0,2374 \cdot \dot{\gamma} \quad (8.5)$$

dónde el término 0,2374 representa la viscosidad.

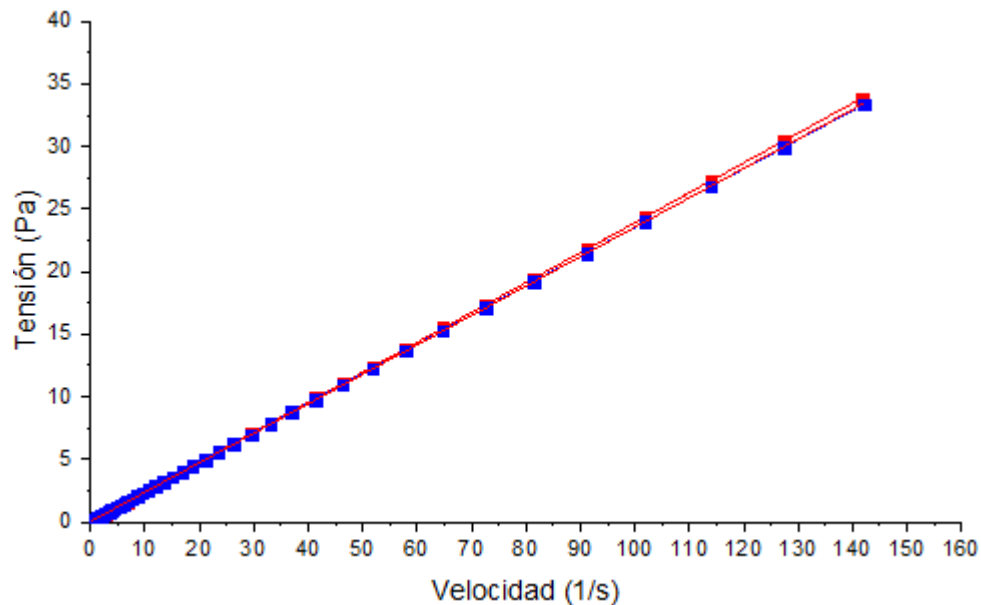


Figura 8.28: Tensión (esfuerzo cortante) en función de la deformación del PPG obtenida experimentalmente

## 8.2. Predicciones de comportamiento en base a ensayos reológicos

### 8.2.1. Según el Modelo de Jie Liang

#### 8.2.1.1. Estimación con mezcla al 20%

Sustituyendo en la ecuación 5.12 el término de la viscosidad, y cambiando los límites de viscosidad a velocidad del émbolo, se obtiene como varía la fuerza con la velocidad de desplazamiento del émbolo:

$$F(v_p) = \begin{cases} \left[ 2,88 + \frac{1,03}{1 + \left[ 8,465 \cdot \frac{(134,46 \cdot v_p)^2}{7,02 - 134,46 \cdot v_p} \right]^{0,6704}} \right] \cdot 13,51 v_p & v_p \leq 0,0522 \\ \left[ 79,89 - \frac{77,01}{1 + \left[ 1,633 \cdot \frac{134,46 \cdot v_p - 7,02}{60,4 - 134,46 \cdot v_p} \right]^{2,175}} \right] \cdot 13,51 v_p & 0,0522 \leq v_p \leq 0,4492 \\ \left[ \frac{79,89}{1 + [5,473 \cdot 10^{-3} (134,46 \cdot v_p - 60,4)]^{1,165}} \right] \cdot 13,51 v_p & 0,4492 \leq v_p \end{cases} \quad (8.6)$$

La Figura 8.29 muestra la representación gráfica de la ecuación 8.6

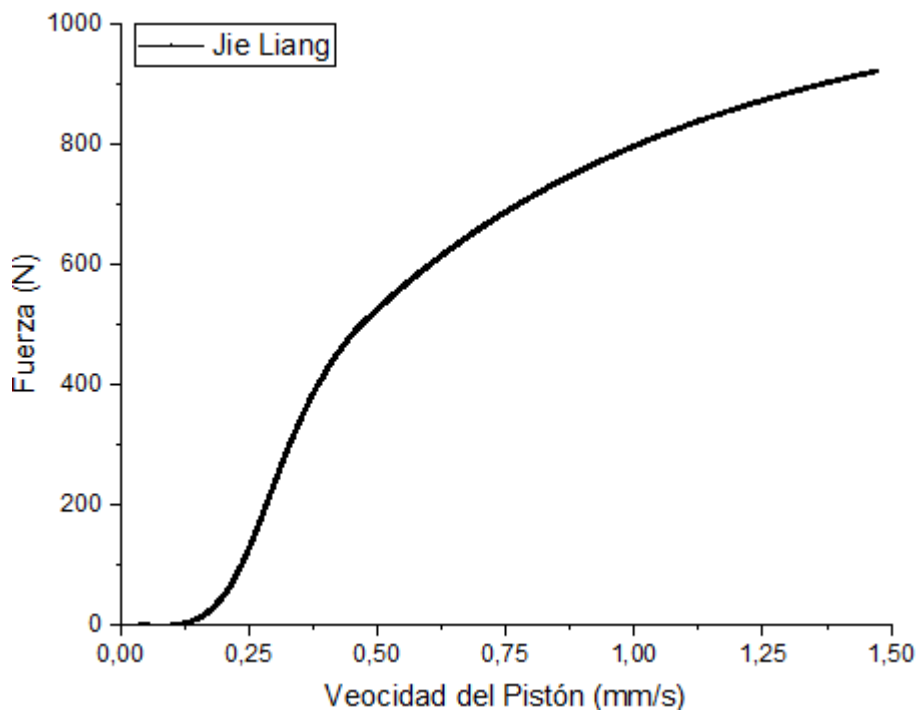


Figura 8.29: Fuerza teórica en función de la velocidad del pistón para mezcla al 20% según Jie Liang

Aplicando nuevamente el ajuste curvas por MATLAB, se ha procedido a aproximar la curva a la característica de un STU (ecuación 7.1), obteniéndose la siguiente función:

$$F = 784 \cdot v_p^{0,6} \quad (8.7)$$

La Figura 8.30 muestra la comparación de las curvas predichas por el Modelo de Jie Liang (ecuación 8.6) y la aproximación al modelo ideal de STU (ecuación 8.7).

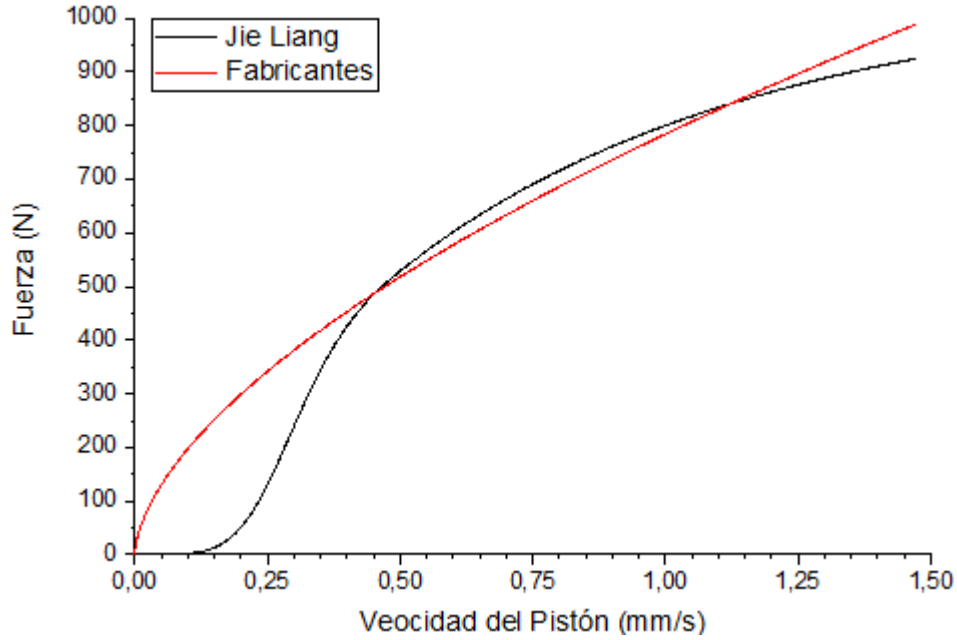


Figura 8.30: Comparación de los modelos de Jie Liang con el de los fabricantes

#### 8.2.1.2. Estimación con mezcla al 15%

Realizando la misma sustitución que para la mezcla al 20% en la ecuación 5.12, se obtiene como varía la fuerza con la velocidad de desplazamiento del émbolo (se han operado términos para compactarla):

$$F(v_p) = \begin{cases} \left[ 1,65 + \frac{0,75}{1 + \left[ \frac{475,31 \cdot 10^3 \cdot v_p^2}{5,6 - 134,46 \cdot v_p} \right]^{0,5869}} \right] \cdot 13,51 v_p & v_p \leq 0,042 \\ \left[ 29,79 - \frac{28,14}{1 + \left[ \frac{195,03 \cdot v_p - 8,121}{73,03 - 134,46 \cdot v_p} \right]^{2,698}} \right] \cdot 13,51 v_p & 0,042 \leq v_p \leq 0,543 \\ \left[ \frac{29,79}{1 + [0,835 \cdot v_p - 0,453]^{1,714}} \right] \cdot 13,51 v_p & 0,543 \leq v_p \end{cases} \quad (8.8)$$

La Figura 8.31 muestra la representación gráfica de la ecuación 8.8.

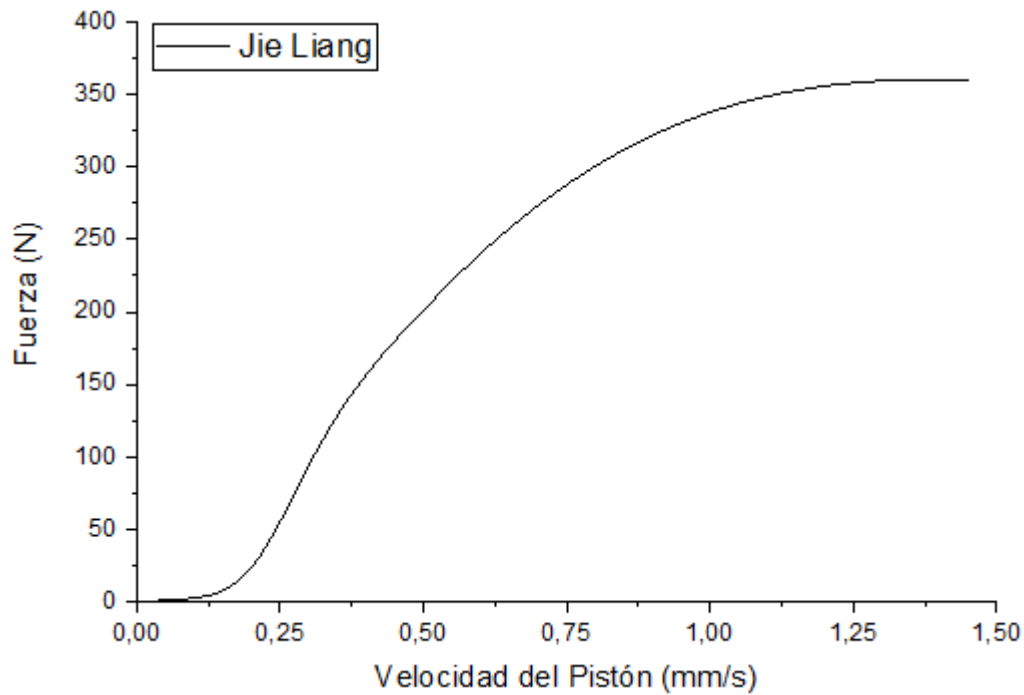


Figura 8.31: Fuerza teórica en función de la velocidad del pistón para mezcla al 15%

Aplicando nuevamente el ajuste curvas por MATLAB, se ha procedido a aproximar la curva a la característica de un STU (ecuación 7.1), obteniéndose la siguiente función:

$$F = 314,9 \cdot v_p^{0,7} \quad (8.9)$$

La Figura 8.32 muestra la comparación de las curvas predichas por el Modelo de Jie Liang (ecuación 8.8) y la aproximación al modelo ideal de STU (ecuación 8.9).

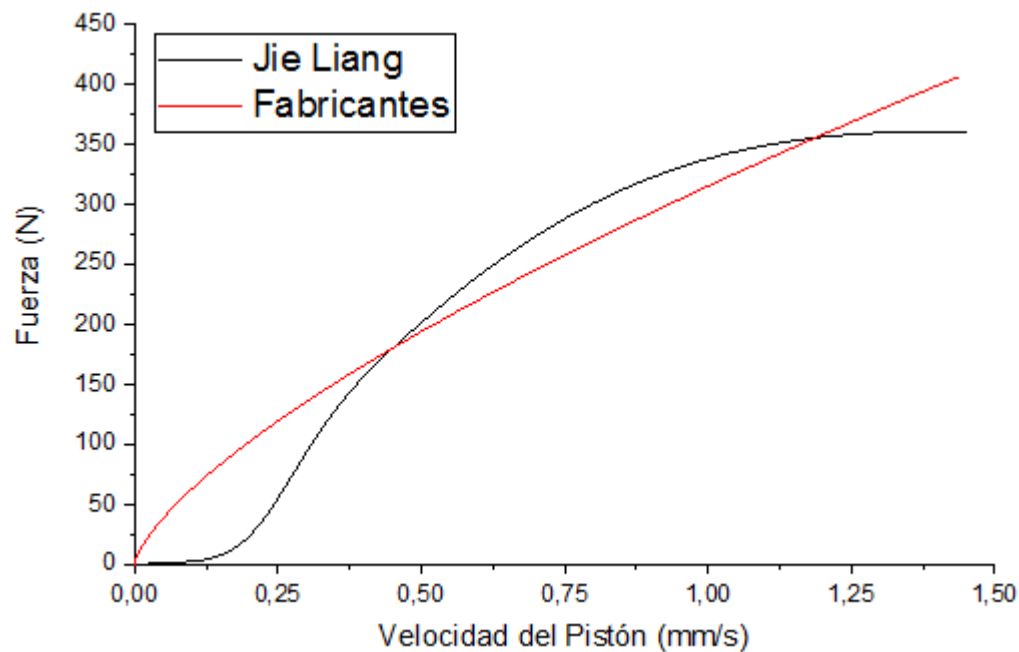


Figura 8.32: Comparación de los modelos de Jie Liang con el de los fabricantes



### 8.2.2. Según el modelo de Spencer

El modelo de Spencer conduce a ecuaciones exactamente iguales que el modelo de Jie Liang, salvo que en este caso  $N_2$  se sustituye por  $N_3$ , por lo que el cociente de ambos define la relación entre un modelo y otro:

$$\frac{N_3}{N_2} = 1,061$$

Así se sabe que con el modelo de Spencer la fuerza será un 6,1% mayor. A este término habría que sumarle el de precarga ( $F_f$ ), que es desconocido.

#### 8.2.2.1. Mezcla al 20%

Al igual que en el caso anterior, se puede definir la fuerza en base a la ecuación 5.12, obteniéndose la siguiente función:

$$F_v(v_p) = \begin{cases} \left[ 2,88 + \frac{1,03}{1 + \left[ 8,465 \cdot \frac{(134,46 \cdot v_p)^2}{7,02 - 134,46 \cdot v_p} \right]^{0,6704}} \right] \cdot 14,329 v_p & v_p \leq 0,0522 \\ \left[ 79,89 - \frac{77,01}{1 + \left[ 1,633 \cdot \frac{134,46 \cdot v_p - 7,02}{60,4 - 134,46 \cdot v_p} \right]^{2,175}} \right] \cdot 14,329 v_p & 0,0522 \leq v_p \leq 0,4492 \\ \left[ \frac{79,89}{1 + [0,005473 \cdot (134,46 \cdot v_p - 60,4)]^{1,165}} \right] \cdot 14,329 v_p & 0,4492 \leq v_p \end{cases} \quad (8.10)$$

Representado gráficamente la ecuación 8.10 se obtiene el gráfico de la Figura 8.33.

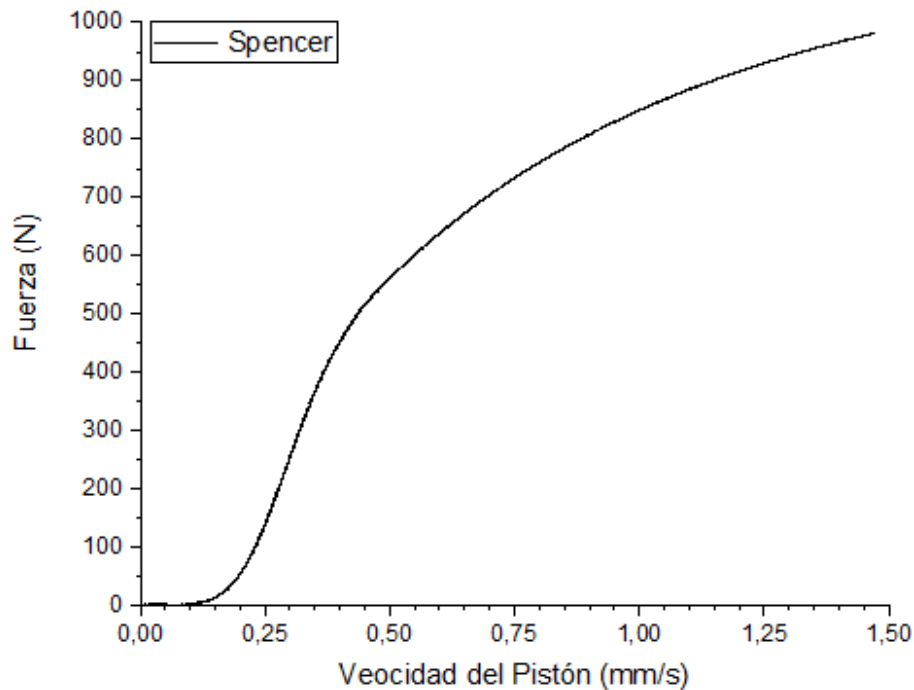


Figura 8.33: Fuerza en función de la velocidad del pistón para mezcla al 20% según Spencer

Aplicando nuevamente el ajuste curvas por MATLAB, se ha procedido a aproximar la curva a la característica de un STU (ecuación 7.1), obteniéndose la siguiente función:

$$F = 831,8 \cdot v_p^{0,6} \quad (8.11)$$

La Figura 8.34 muestra la comparación de la curva correspondiente a la ecuación 8.11 con la de la Figura 8.33 (ecuación 8.10).

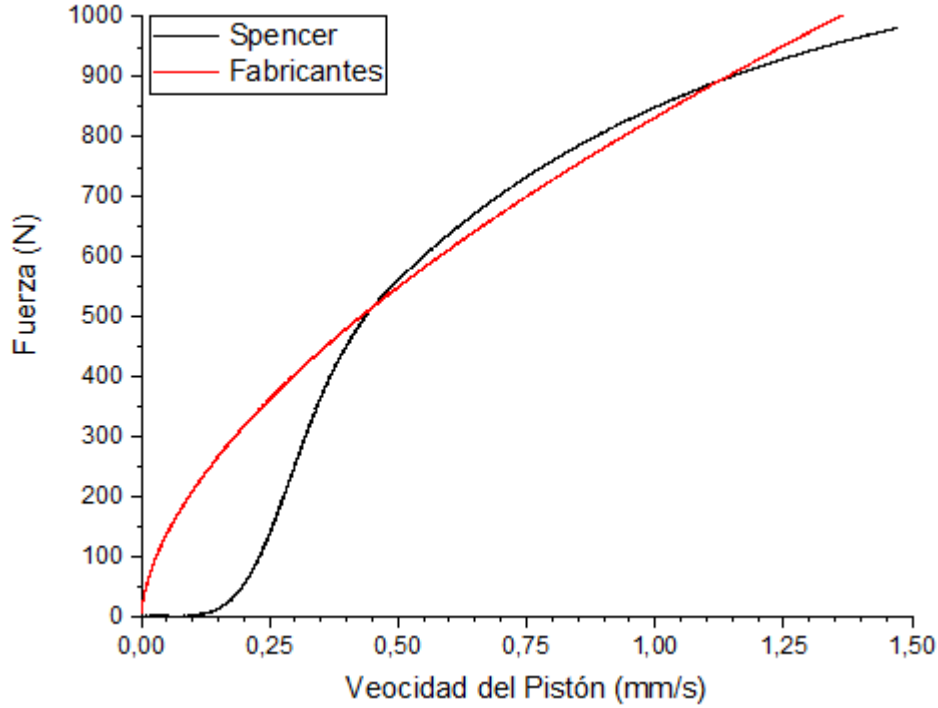


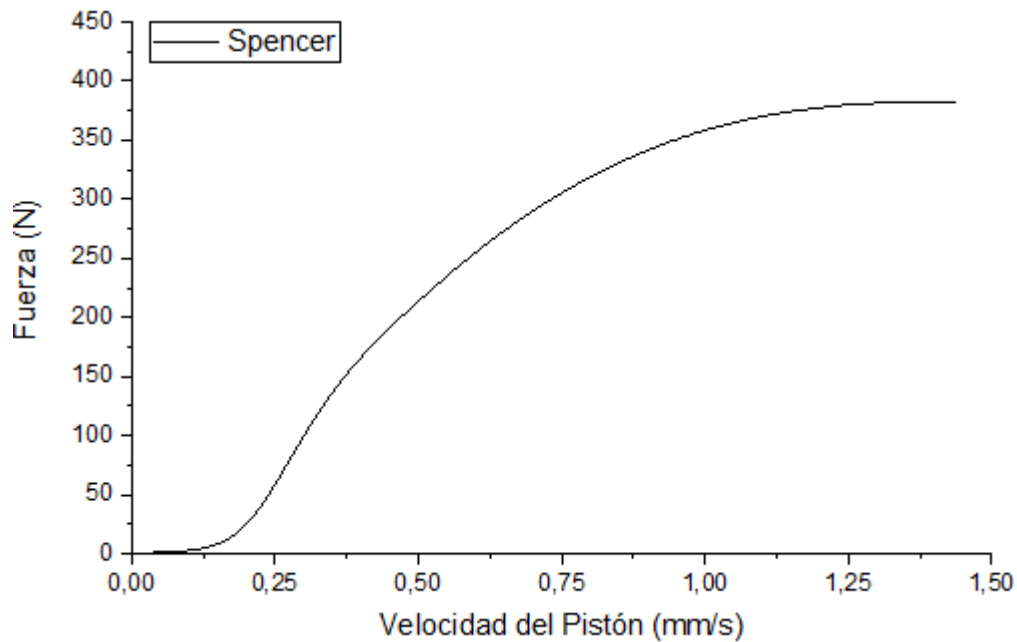
Figura 8.34: Comparación de los modelos de Jie Liang con el de los fabricantes

#### 8.2.2.1. Mezcla al 15%

Al igual que en el caso anterior, se puede definir la fuerza en base a la ecuación 5.12, obteniéndose la siguiente función:

$$F(v_p) = \begin{cases} \left[ 1,65 + \frac{0,75}{1 + \left[ \frac{475,31 \cdot 10^3 \cdot v_p^2}{5,6 - 134,46 \cdot v_p} \right]^{0,5869}} \right] \cdot 14,329 v_p & v_p \leq 0,042 \\ \left[ 29,79 - \frac{28,14}{1 + \left[ \frac{195,03 \cdot v_p - 8,121}{73,03 - 134,46 \cdot v_p} \right]^{2,698}} \right] \cdot 14,329 v_p & 0,042 \leq v_p \leq 0,543 \\ \left[ \frac{29,79}{1 + [0,835 \cdot v_p - 0,453]^{1,714}} \right] \cdot 14,329 v_p & 0,543 \leq v_p \end{cases} \quad (8.12)$$

Representado gráficamente la ecuación 8.12 se obtiene el gráfico de la Figura 8.35.

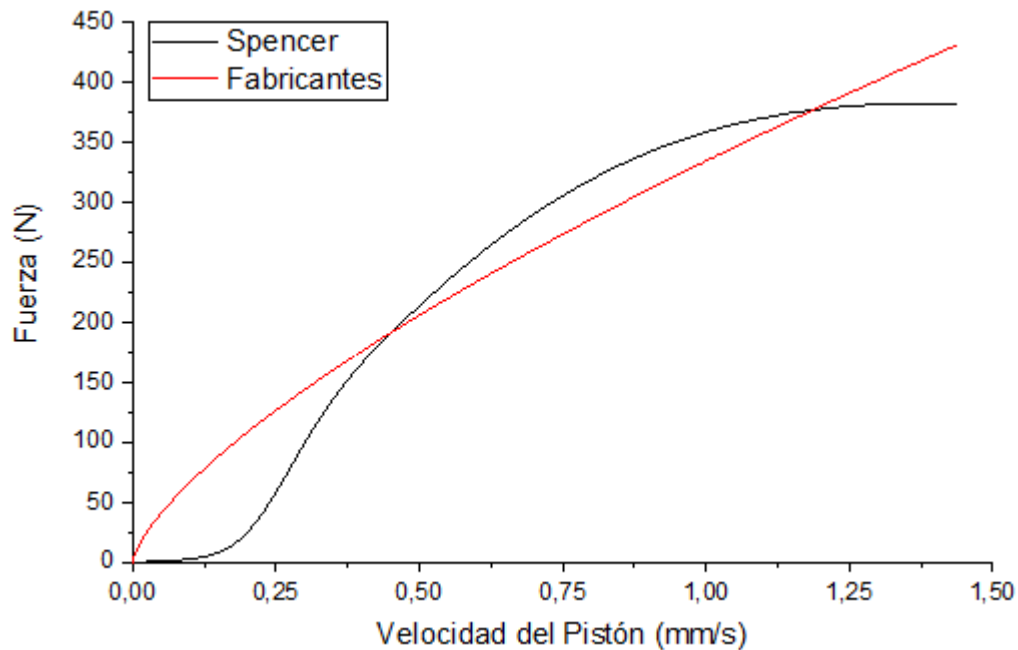


**Figura 8.35:** Fuerza en función de la velocidad del pistón para mezcla al 20% según Spencer

Aplicando nuevamente el ajuste curvas por MATLAB, se ha procedido a aproximar la curva a la característica de un STU (ecuación 7.1), obteniéndose la siguiente función:

$$F = 831,8 \cdot v_p^{0,6} \quad (8.13)$$

La Figura 8.36 muestra la comparación de la curva correspondiente a la ecuación 8.12 con la ecuación 8.13.



**Figura 8.36:** Comparación del modelo de Spencer con el de los fabricantes

---

*Capítulo 9*  
*Conclusiones*

---

## Capítulo 9. Conclusiones

---

A continuación se detallan las conclusiones obtenidas para los diferentes ensayos y predicciones realizados en este trabajo.

### 9.1. Caracterización reológica de los fluidos

Como era de esperar, la viscosidad obtenida para la mezcla al 20% es mayor que para la mezcla al 15%. No obstante, esta diferencia resulta bastante considerable entre uno y otro, algo por encima de lo esperado. Ambos fluidos presentan un comportamiento espesante discontinuo (DST), lo que implica que los grados de concentración escogidos son acertados a priori, si bien dependiendo de la aplicación del STU, se optará por uno u otro.

El modelo de Galindo y Rosales [20] resulta bastante bueno prediciendo las regiones de comportamiento I y II, pero falla en el región III. En parte este problema se debe a la dificultad de llevar a cabo mediciones con el reómetro con velocidad de cizalla tan elevada. No obstante, más que un fallo de ese modelo lo que hay es una enorme incertidumbre en la región III, pues los ensayos oscilatorios y lineales presentan resultados contradictorios. Esta incertidumbre impide hacer una regresión correcta en esa región, aun así, el modelo de Galindo y Rosales tiende a proporcionar una pendiente muy brusca en esa región.

Queda constatado que los fluidos dilatantes presentan características viscoelásticas cuando son sometidos a excitaciones oscilatorias. No obstante, la regla Cox-Mertz modificada no se cumple como norma general, si bien para cada una de las muestras si se ha encontrado una curva de velocidad dinámica que se asemeja a la de viscosidad frente a la velocidad de cizalla. No obstante, para poder dar validez a la regla de Cox-Mertz modificada todas las curvas de los ensayos oscilatorios deberían de ser muy próximas a las de los ensayos lineales.

### 9.2. Modelos de STU

Ambos modelos predicen una curva de comportamiento igual desde el punto de vista de la forma de la gráfica, si bien con el de Spencer se obtienen fuerzas algo mayores.

Dadas las curvas obtenidas, el comportamiento de los fluidos STF hace que los STU no se comporten de acuerdo a la curva que dan los fabricantes (ecuación 7.1), si bien es cierto que también existe una velocidad de bloqueo (que puede determinarse conociendo la fuerza de bloqueo).

Aun así, queda constatado que esta velocidad de bloqueo es muy alta o la fuerza de bloqueo muy baja, al menos en este dispositivo, pues para valores de velocidad del pistón de 0,01 mm/s la fuerza de reacción es inferior a 1 N para ambos fluidos. No obstante hay que tener en cuenta que los STU existentes, y a los que hacen referencia las normas, son mucho más grandes que el desarrollado por el departamento, por lo que esa diferencia puede ser aceptable.

Es por esto que si bien los fluidos dilatantes no pueden descartarse para su empleo en STU, sí que habría que adaptar los modelos de comportamiento de los mismos.

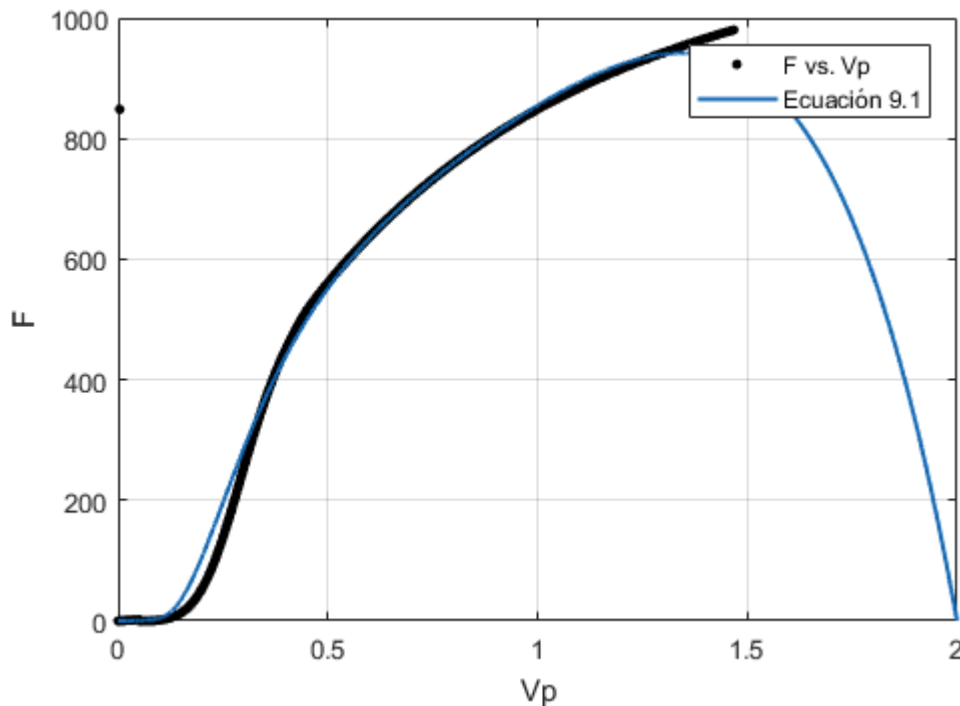
Uno de los problemas por los que la curva obtenida experimentalmente no se ajusta correctamente a la que dan los fabricantes es la existencia de una zona cóncava y otra convexa en la curva de viscosidad. Para solucionar esto, se propone la siguiente expresión para ajustar el comportamiento:

$$F = A \cdot \left(1 - \frac{v_p}{2}\right) \cdot \left(v_p^{B+C \cdot v_p} + v_p^{\frac{C}{v_p}}\right) \quad (9.1)$$

Dónde se han incorporado los coeficientes adimensionales A, B y C (que deben ser estrictamente positivos) para que la función tenga comportamiento cóncavo y convexo. Esta curva se adapta muy bien al comportamiento predicho para velocidades del pistón de hasta 1,5 m/s aproximadamente, pero por encima de esa velocidad la curva se vuelve muy decreciente; aunque no debería suponer un problema pues alcanzar velocidades tan elevadas no es habitual. La función podría ser más precisa utilizando más coeficientes, pero se ha preferido hacerla más sencilla.

Para la mezcla al 20%, realizando la regresión con MATLAB se ha obtenido la función que se representa en la Figura 9.1 (la línea azul muestra la ecuación 9.1):

$$F = 854,9 \cdot \left(1 - \frac{v_p}{2}\right) \cdot \left(v_p^{2,461+0,2635 \cdot v_p} + v_p^{\frac{0,2635}{v_p}}\right) \quad (9.2)$$



**Figura 9.1: Modelo de regresión propuesto para la mezcla al 20%**

Para la mezcla al 15%, realizando la regresión con MATLAB se ha obtenido la función que se representa en la Figura 9.2 (la línea azul muestra la ecuación 9.1):

$$F = 356,4 \cdot \left(1 - \frac{v_p}{2}\right) \cdot \left(v_p^{2,182+0,3482 \cdot v_p} + v_p^{\frac{0,3482}{v_p}}\right) \quad (9.3)$$

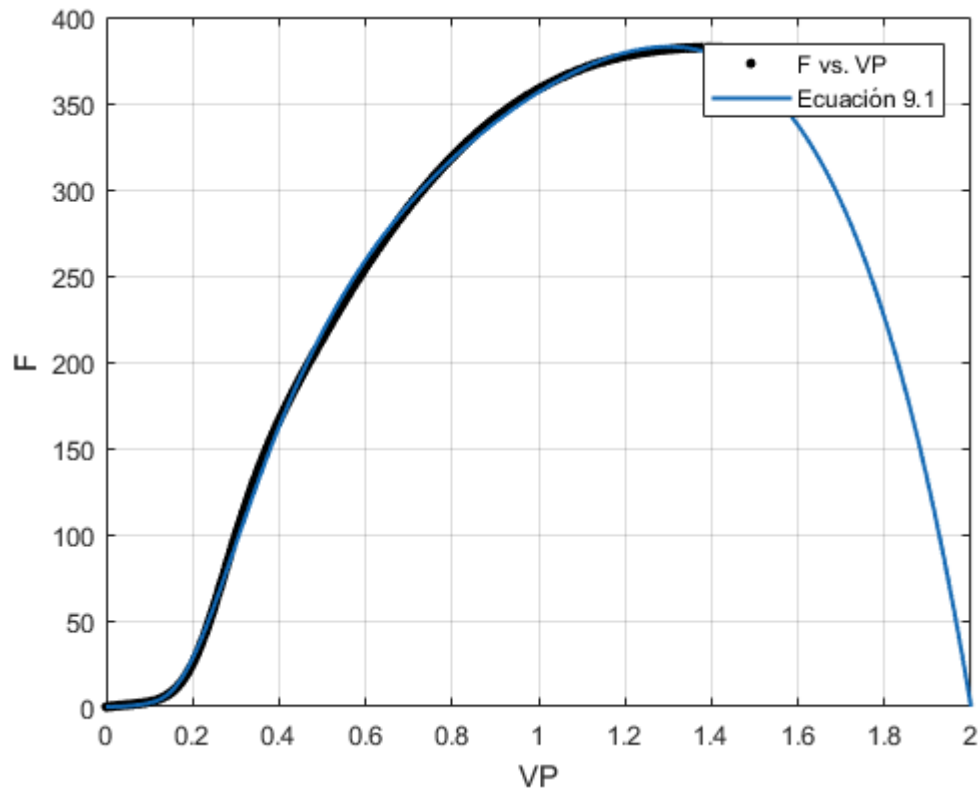


Figura 9.2: Modelo de regresión propuesto para la mezcla al 15%

En ambas curvas se observa que el ajuste es bastante exacto, por lo que la ecuación puede emplearse para la predicción del comportamiento.

### 9.3. Trabajos futuros

En base a las conclusiones anteriormente expuestas, resultaría de gran interés:

1. Evaluar el comportamiento de ambos fluidos dentro del STU, cosa que ha resultado imposible debido a una avería en la máquina de ensayos. De esta forma se podría determinar, aparte del comportamiento real, cuál de los dos modelos matemáticos encontrados en la bibliografía resulta más preciso.
2. Durante esos ensayos, aparte de caracterizar el fluido, llevar a cabo las pruebas de las normas recogidas en este documento a fin de demostrar la viabilidad del STU. En ese sentido, es especialmente importante la europea, que es la que permitiría la comercialización del producto.
3. Por otro lado, se puede seguir profundizando en la obtención de un modelo de comportamiento de fluido STF basado en el de Galindo y Rosales, pero que mejore su precisión en la región III de comportamiento. Se podría tomar como base los ensayos oscilatorios para determinar esa región.
4. Con respecto a los fluidos, sería interesante comprobar que sucede con otras mezclas, ya sea variando la concentración de la fase dispersa, la propia fase dispersa o incluso otro tipo de fluidos que no sean dilatantes.
5. Comprobar la validez de la ecuación 9.1 con ensayos experimentales, modificándola en caso de que sea necesario.

---

*Capítulo 10*  
***Entorno Socio-  
Económico***

---



## Capítulo 10. Entorno socio-económico

Dado que se trata de un proyecto experimental, resulta difícil establecer el impacto económico del mismo, pues al no ser un producto comercializable, no puede llevarse a cabo un estudio de mercado.

### 10.1. Impacto económico

Dado que los experimentos llevados a cabo pueden ser tomados como referencia para futuros desarrollos, no solo académicos, sino también industriales; se puede determinar que el impacto es positivo desde ese punto de vista.

En ese sentido, el empleo de estos nuevos materiales puede resultar en ahorros a largo plazo en mantenimiento de las estructuras donde sean instalados. A su vez, la incorporación de nueva tecnología supondrá una mayor competencia.

### 10.2. Presupuesto

La Tabla 10.1 recoge el detalle de los gastos incurridos para la realización de este proyecto. Hay que tener en cuenta que es difícil asignar el coste exacto del software, pues si bien es necesario, no ha sido dedicado exclusivamente a la realización de este trabajo, sino también para otros fines. Además este software seguirá estando disponible una vez concluido el mismo.

Tabla 10.1: Presupuesto

Concepto	Grado de Utilización	Coste unitario	Coste
<b>Dispositivo</b>			
STU	100%	150,00 €	150,00 €
<b>Ensayos</b>			
Sesión de ensayos Laboratorio	100%	25,00 €	25,00 €
<b>Material</b>			
Báscula	5%	5,00 €	0,25 €
Bote de Sílice Pirógena	10%	10,00 €	1,00 €
Bote PPG	10%	10,00 €	1,00 €
Botella y vaso	5%	0,60 €	0,03 €
Varillas	5%	0,50 €	0,05 €
<b>Programas</b>			
Licencia MATLAB	50%	300,00 €	150,00 €
Licencia OriginPro 2017 Student Version	50%	63,36 €	31,68 €
Licencia Office 365 Universitarios	20%	79,00 €	15,80 €
<b>Total</b>			<b>379,80 €</b>

A la vista de la Tabla 10.1, se observa que los materiales empleados no son particularmente caros. Pero hay que tener en cuenta que en este caso el proceso de

sintetización de los fluidos ha sido manual, cosa que no podría hacerse a escala industrial, incurriendo así en costes mayores.

### **10.3. Impacto social**

Desde un punto de vista social, el impacto resulta muy positivo, al desarrollarse una mejora de la seguridad de las infraestructuras públicas. No solo redundará en una mayor vida de las infraestructuras civiles, sino que en último término puede ayudar a salvar vidas durante terremotos.

Además también hay que considerar que este trabajo (junto con otros muchos) sienta las bases de la investigación tanto con STU como con STF, algo que será de interés para la comunidad científica.

### **10.4. Impacto ambiental**

Ninguno de los productos empleados durante este proyecto está catalogado como peligroso o contaminante, por lo que se puede considerar un impacto ambiental nulo. Tampoco se aprecia ningún tipo de impacto ambiental en el desecho de los productos empleados.

Por otro lado, para el desarrollo del miso tampoco se han producido niveles de ruido que merezcan ser considerados.



---

*Anexo A*  
*Glosario*

---

## Anexo A.      Glosario

---

- Suspensión [36]:** f. *Quím.* «Mezcla heterogénea formada por un sólido en polvo o pequeñas partículas no solubles (fase dispersa) que se dispersan en un medio líquido (fase dispersante o dispersora). Las partículas en las suspensiones son visibles a nivel macroscópico, es decir, a simple vista. Además al reposar las fases de una suspensión se separan, la suspensión es filtrable.»
- Coloide [36]:** f. *Quím.* «Mezcla que están entre la homogénea y la heterogénea, sus partículas son de 10 a 100 nanómetros de diámetro, no se ven a simple vista, no sedimentan en reposo y no se pueden separar por filtración, los coloides están formados por una fase dispersa y una fase dispersora, a diferencia de las disoluciones presentan el Efecto Tyndall, es decir, al pasar un haz de luz la dispersan.»
- Floculación [37]:** f. *Quím.* «Agregación de partículas sólidas en una dispersión coloidal, en general por la adición de algún agente.»
- Oxihidrógeno [38]:** m. *Quím.* «Mezcla gaseosa de Hidrógeno diatómico y Oxígeno en una proporción de 2:1 como se encuentra en el agua, nada más que separados y en forma gaseosa.»
- Hidrófilo [37]:** adj. «Dicho de una materia o una sustancia: Que adsorbe el agua con gran facilidad.»
- Cavitación [37]:** f. *Fís.* «Formación de burbujas de vapor o de gas en el seno de un líquido, causada por las variaciones que este experimenta en su presión.»

---

*Anexo B*

***Características de los  
materiales utilizados***

---

## Anexo B. Características de los materiales utilizados

### B.1. Polipropilenglicol

El polipropilenglicol (PPG) seleccionado es el Aldrich P1,200 que se ve en la Figura B.1, y se ajusta a las siguientes características de la Tabla B.1.

**Tabla B.1: Características del producto [39]**

Marca	81370
Referencia	Aldrich
No. CAS	25322-69-4
No. CE	500-039-8
Fórmula química	$C_3H_8O_2$



**Figura B.10.1: Bote de PPG empleado**

El producto presenta las propiedades de la Tabla B.10.2.

**Tabla B.2: Propiedades del producto [39]**

Aspecto	Forma: líquido
Punto de fusión	$< -150\text{ }^{\circ}\text{C}$
Punto de ebullición	$287,6\text{ }^{\circ}\text{C}$
Punto de inflamación	$184\text{ }^{\circ}\text{C}$
Presión de vapor	$< 0,01\text{ hPa a } 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura de auto-inflamación	$305\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tensión superficial	$63,62\text{ mN/m a } 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Densidad	No especificada

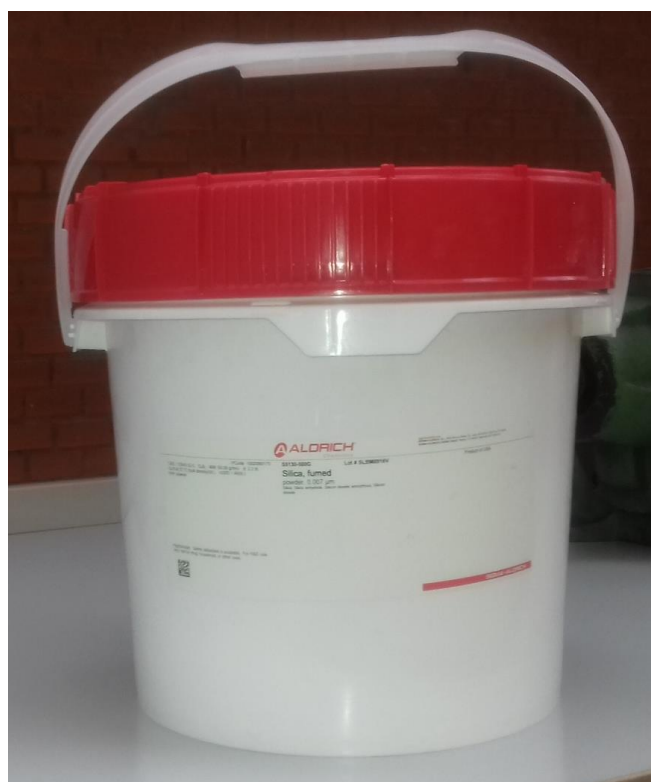
Este producto no está catalogado como peligroso, por lo que no requiere de medidas de manipulación especiales. Además presenta estabilidad química en condiciones normales, si bien el fabricante indica que no se mezcle con agentes oxidantes fuertes.

## B.2. Sílice pirógena

La sílice pirógena empleada es la Aldrich S5130 de la Figura B.2, que presenta las características de la Tabla B.3.

**Tabla B.3: Características del producto [40]**

Fabricante	Aldrich
Referencia	S5130
Tamaño de la partícula	0,007 $\mu\text{m}$
Área de la superficie	395 $\pm$ 25 $\text{m}^2/\text{g}$
Densidad	36,8425 $\text{kg}/\text{m}^3$



**Figura B.2: Bote de sílice pirógena**

El producto es infinitamente estable si se almacena en una habitación climatizada y se mantiene seco. Dada su tendencia a adsorber la humedad, la vida útil del producto, una vez abierto, es de unos dos años [40].

Las mezclas sintetizadas con está sílice pirógena son bastante estables dentro de un rango de temperaturas, permaneciendo sus propiedades inalteradas durante meses [40].





---

*Anexo C*  
*Características y planos*  
*del STU*

---

## Anexo C. Características y planos del STU

El STU ensayado es un modelo de pequeño tamaño desarrollado por el departamento de Ingeniería Mecánica. Está fabricado de acero en su mayor parte.

El dispositivo se compone de 4 conjuntos (que son de los que a continuación se detallan los planos):

- Vástago: se corresponde con el vástago descrito en el apartado 3.2. Está compuesto a su vez de dos piezas que encajan roscadas. Puede verse en la figura C.1.
- Tapa 2: es una de las partes de la carcasa del STU. Puede verse en la figura C.2.
- Tapa 1: es la otra parte de la carcasa del STU. Puede verse en la figura C.3.
- Cuerpo: parte central del dispositivo. Puede verse en la figura C.4.

### C.1. Dimensiones relevantes

La Tabla C.1 recoge algunas de las dimensiones que han sido empleadas en el Capítulo 7 para determinar las leyes de comportamiento del dispositivo, puede observarse la Figura 7.3 para entender mejor que representa cada parámetro.

Tabla C.1: Dimensiones significativas del STU

Dimensión	Nombre	Descripción	Magnitud
L	Longitud del orificio	Distancia longitudinal que recorre el fluido a través del orificio	14,00 mm
D	Dimensión del orificio anular	Radio de la corona circular del orificio	0,48 mm
$R_0$	Radio de la carcasa	Radio desde el centro del STU hasta la pared interior	27,02 mm
$R_i$	Radio grande	Radio desde el centro del STU hasta el punto más externo del pistón	26,54 mm
r	Radio pequeño	Radio desde el centro del STU hasta el punto más externo del vástago	12,50 mm

### C.2. Planos

A continuación se muestran los planos de los conjuntos anteriormente citados realizados con Solid Edge, en escala 1:1.

#### C.2.1. Vástago

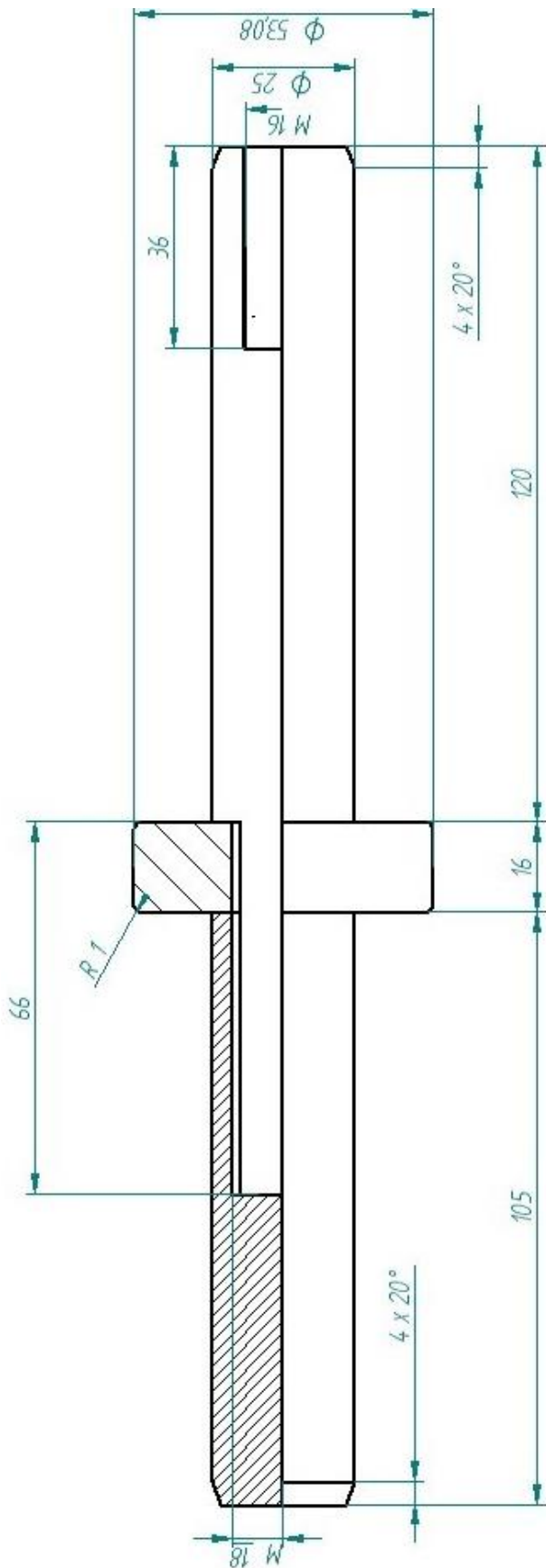


Figura C.1: Plano del vástago del STU

	Nombre	Fecha	Vástago		
Dibujado	angamezm	4/05/17			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		A4	Plano	Rev	
			Archivo: Vastago.dft		
			Escala	Peso	Hoja 1 de 3

C.2.2. Tapa 2

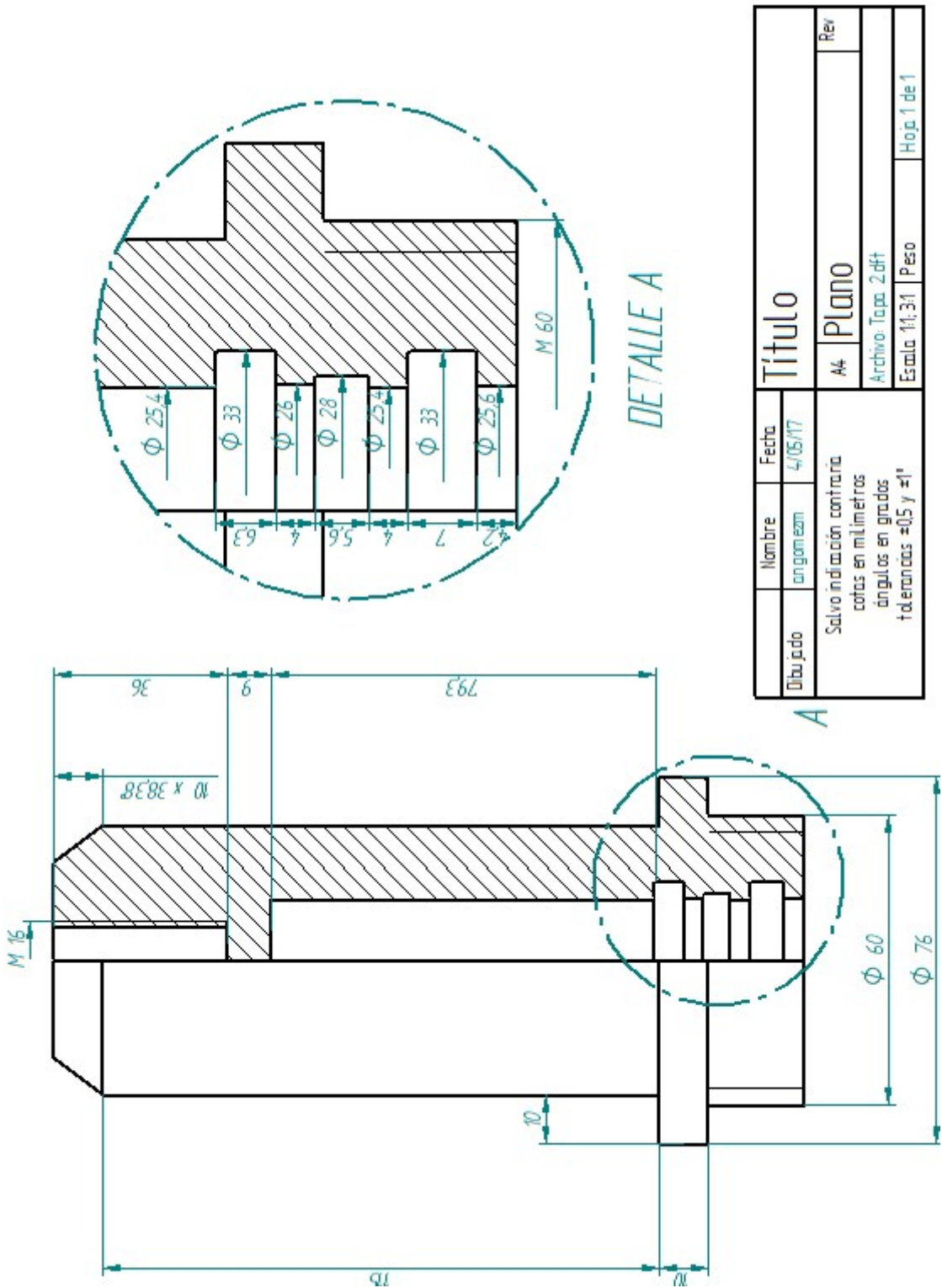


Figura C.2: Plano de la segunda parte de la carcasa

C.2.3. Tapa 1

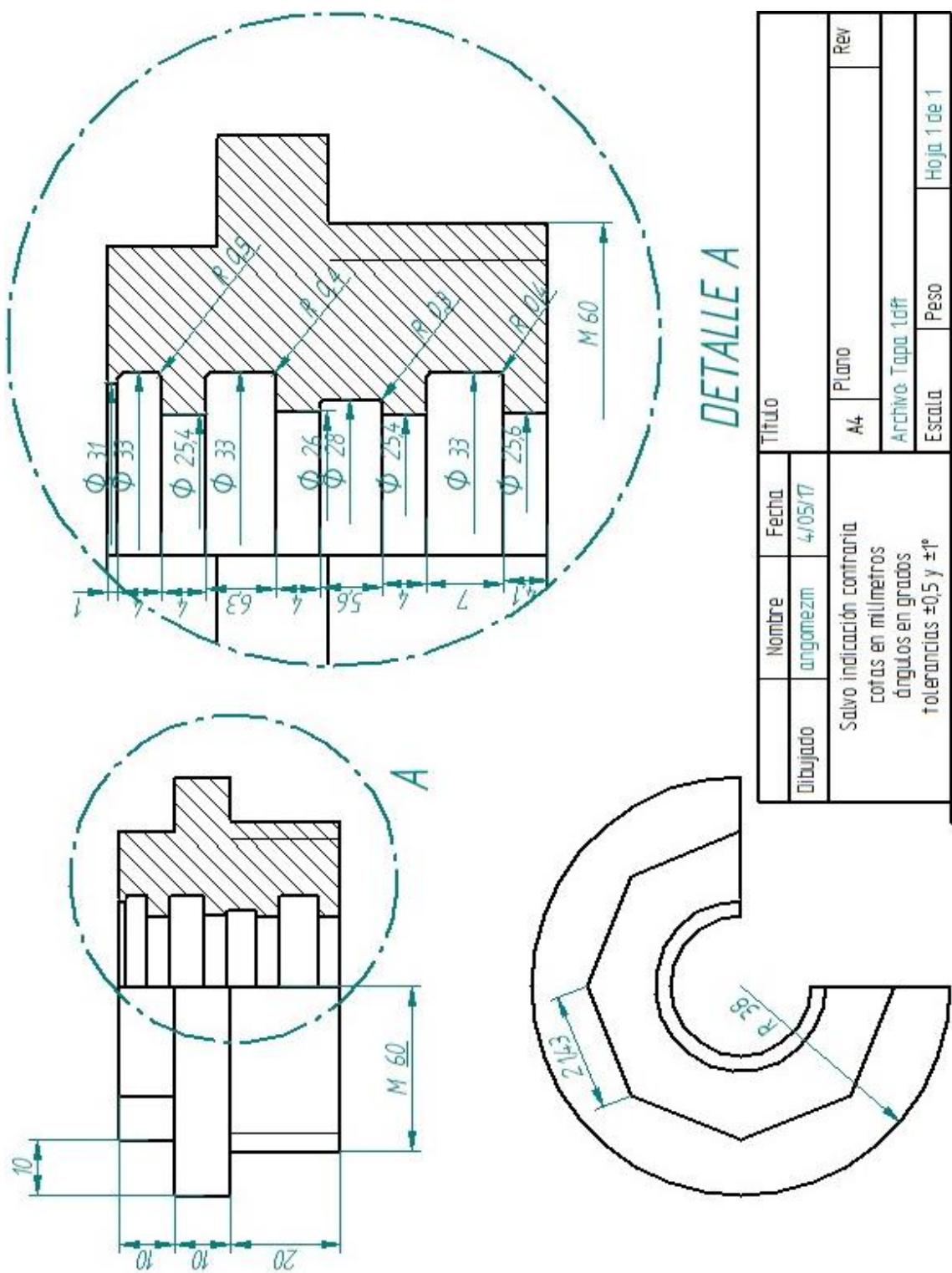


Figura C.3: Plano de la primera parte de la carcasa

#### C.2.4. Cuerpo

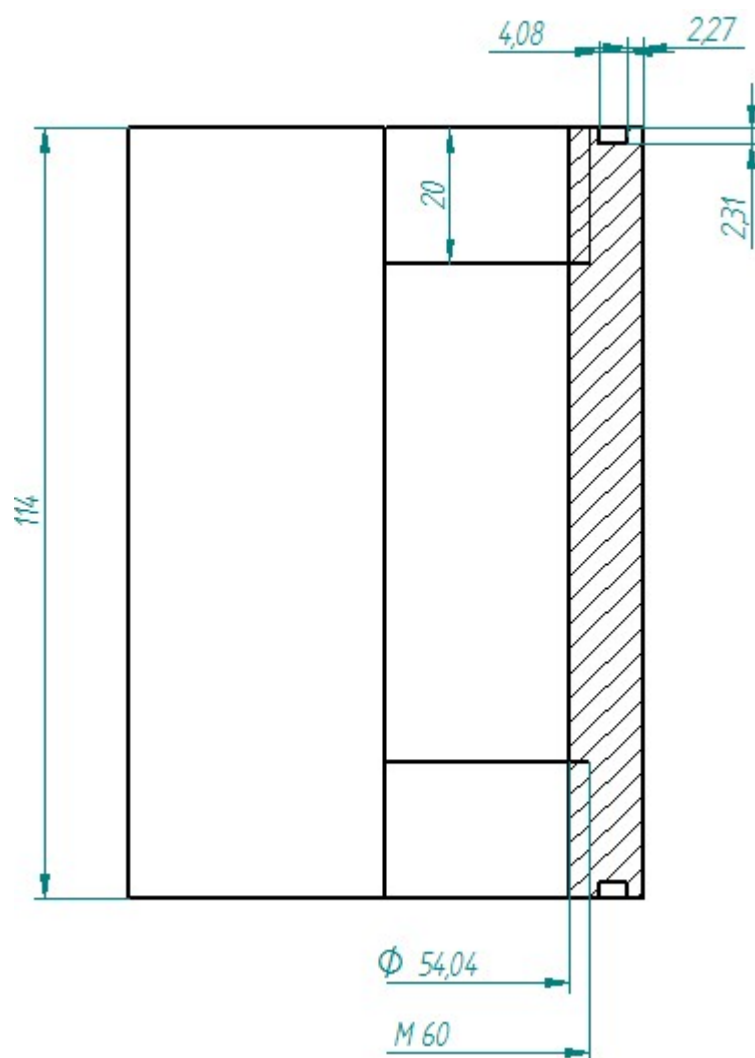


Figura C.4: Plano del cuerpo

---

## *Referencias*

---



## Referencias

---

- [1] F. Marazzi y D. Tirelli, "Combatiendo terremotos: diseño y prueba de edificios antisísmicos", *Science in School. The European journal for science teachers*, 06-08-2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.scienceinschool.org/es/2010/issue15/earthquakes>.
- [2] D. J. Patel, *Shock Transmission Units in Construction*, 1<sup>st</sup> ed. Londres: ICE Publishing, 2013.
- [3] *Dispositivos antisísmicos*, UNE-EN 15129:2009.
- [4] AASHTO, "Section 32 - Shock Transmission Units", en *AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications*. Washington: AASHTO, 2002, 32-1 a 32-10. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/128585630/AASHTO-LRFD-Bridge-Construction-Specifications-2009-Interim#>.
- [5] Mageba, "Transmisor de choque RESTON® STU", *RESTON-STU* 03-2014. [En línea]. Disponible en: [http://www.mageba.net/data/docs/es\\_BR/2580/PROSPECT-RESTON-STU-ch-en.pdf](http://www.mageba.net/data/docs/es_BR/2580/PROSPECT-RESTON-STU-ch-en.pdf).
- [6] Lin Bing-Song, Wang-Ji-Shan y Lin Sheng-Fa, "Agreement on the Mutual Collaboration Between California Department of Transportation and Taiwan Area National Freeway Bureau Republic of China (Amendment No. 2)", Oficina Nacional de Autopistas de Taiwan, República de China. Disponible en: <http://www.freeway.gov.tw/Upload/201309/地震力量分散裝置於國道埔鹽系統交流道橋梁之應用-english.pdf>.
- [7] J. Liang y X.-H. Zhang, "Rheological Properties of SP in Shock Transmission Application", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, n° 9, p. 04014250, Sept. 2015. [En línea]. Disponible en: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001227>. Acceso: Marzo 2017.
- [8] Freyssinet, "STU", *ISOSISM® Technical data sheet reference no.: FTEncV531*. [En línea]. Disponible en: [http://freyssinet.honlap.hu/pages/freyssinet/contents/static/15/doc/lokesszeru-teheratado-ezskoz-shock-transmission-unit\\_en.pdf](http://freyssinet.honlap.hu/pages/freyssinet/contents/static/15/doc/lokesszeru-teheratado-ezskoz-shock-transmission-unit_en.pdf).
- [9] Agom International S.R.L., "VISCOUS DAMPERS (VD) vs SHOCK TRANSMISSION UNITS (STU)", *AGOM H-SAFE DEVICES*, 10-01-2012. [En línea]. Disponible en: [http://agom.it/download/Catalogue/Hydraulic-systems\\_Catalogo.pdf](http://agom.it/download/Catalogue/Hydraulic-systems_Catalogo.pdf).
- [10] J. Liang, "Design and test of annular discharge orifice of shock transmission unit", *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 228, n° 8, pp. 1391 - 1397, Oct. 2013. [En línea]. Disponible en:

- <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954406213507703>. Acceso: Marzo 2017.
- [11] Jarret Structurast, "Viscous Fluid Dampers for Seismic & Civil Engineering Industries", *Documentation*. [En línea]. Disponible en: <http://www.doucehydro.com/fr/catalogue-doucehydro-2013/Jarret-gb/index.html#/14/>.
- [12] Mageba, "Amortiguador precargado RESTON® PSD", *Seismic Protection*, 05-2013. [En línea]. Disponible en: [http://www.mageba.net/data/docs/es\\_BR/2576/PROSPECT-RESTON-PSD-ch-en.pdf](http://www.mageba.net/data/docs/es_BR/2576/PROSPECT-RESTON-PSD-ch-en.pdf).
- [13] D. P. Taylor, "History, Desing, and application of fluid dampers in Structural Engineers", *Taylor Devices inc*. [En línea]. Disponible en: <http://taylordevices.com/papers/history/design.htm>.
- [14] VICODA GmbH, "Hydraulic devices and fluid dampers", *Products & services*, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.vicoda-gmbh.com/products/13-hydraulic-devices-and-fluid-dampers.html>.
- [15] Mageba, "Amortiguador RESTON® SA", *Seismic Protection*, 04-2013. [En línea]. Disponible en: [http://www.mageba.net/data/docs/es\\_BR/2578/PROSPECT-RESTON-SA-ch-en.pdf](http://www.mageba.net/data/docs/es_BR/2578/PROSPECT-RESTON-SA-ch-en.pdf).
- [16] G. Schramm, *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*, 2<sup>nd</sup> ed. Karlsruhe: Gebrueder HAAKE GmbH, 2000.
- [17] C. A. Silva Blanco, "Caracterización reológica de hidrocoloides alimentarios: goma guar, goma tragacanto, tragacanto", Tesis Doctoral, Dpto. de Ingeniería Química, Universidad de Santiago de Compostela, La Coruña, España, Junio 2010. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10347/2875>.
- [18] M. Pilar Morés y J. Silva Treviño, "Implementación de una Metodología para la determinación de Propiedades Reológicas", Proyecto de Fin de carrera, Dpto. de Ciencia y Tecnología de Materiales Fluidos, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial, Zaragoza, España, Junio 2010. [En línea]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/5222/files/TAZ-PFC-2010-252.pdf>.
- [19] S. González Roldán, "Diseño mecánico de un equipo para medida de la viscosidad en fluidos no newtonianos", Proyecto de fin de carrera, Dpto. de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, España, Febrero 2009. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10317/960>.
- [20] F. J. Galindo Rosales y F. J. Rubio Hernandez, "An apparent viscosity function for shear thickening fluids", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 166, nº 5-6, pp. 321-325, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2011.01.001>. Acceso: Febrero 2017.

- [21] E. Brown y H. M. Jaeger, "Shear thickening in concentrated suspensions: phenomenology, mechanisms and relations to jamming", *Reports on Progress in Physics*, vol. 77, nº 4, p. 046602, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/77/4/046602/meta;jsessionid=2132DCED3D1DB821C48E38C59C7FA0B5.c4.iopscience.cld.iop.org>. Acceso: Febrero 2017.
- [22] P. Passey, "Study of pre-shearing protocol and rheological parameters of shear thickening fluids containing nano particles", Tesis Doctoral, Dpto. de Ingeniería Química, Universidad de Thapar, Punjab, India, Julio 2016. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10266/3989>.
- [23] S. Yildiz, "Synthesis and rheological behavior of shear thickening fluids (STFs) for liquid armor applications", Tesis Doctoral, Instituto Tecnológico de Esmirna, Turquía, Diciembre 2013.
- [24] T. V. Wolson, "How Liquid Body Armor Works", HowStuffWorks, 02-26-2007. [En línea]. Disponible en: <http://science.howstuffworks.com/liquid-body-armor1.htm>.
- [25] B. J. Maranzano y N. J. Wagner, "The effects of interparticle interactions and particle size on reversible shear thickening: Hard-sphere colloidal dispersions", *Journal of rheology*, vol. 45, nº 5, pp. 1205-1222, Junio 2001. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1122/1.1392295>. Acceso: Febrero 2017.
- [26] M. Hasanzadeh y V. Mottaghitalab, "The Role of Shear-Thickening Fluids (STFs) in Ballistic", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, nº 4, pp. 1182-1196, Abril 2014. [En línea]. Disponible en: <https://link-springer-com.biblioteca5.uc3m.es/article/10.1007%2Fs11665-014-0870-6>. Acceso: Febrero 2017.
- [27] R. Moreno Botella, *Reología de suspensiones cerámicas*, Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2005.
- [28] A. D. Moriana, T. Tian, V. Sencadas y W. Li, "Comparison of rheological behaviors with fumed silica-based shear thickening fluids", *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 28, nº 3, pp. 197-205, Ago. 2016. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.056>. Acceso: Marzo 2017.
- [29] Y. Xu, X. Chen, Y. Wang y Z. Yuan, "Stabbing resistance of body armour panels impregnated with shear thickening fluid", *Composite Structures*, vol. 163, pp. 465-473, Marzo 2017. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.056>. Acceso: Marzo 2017.
- [30] Hielscher Ultrasonics GmbH, "Ultrasonic Homogenizing And Blending", *Hielscher – Ultrasound Technology*, [En línea]. Disponible en: [https://www.hielscher.com/homogenize\\_01.htm](https://www.hielscher.com/homogenize_01.htm).
- [31] Flexicon Corp., "Sílice Pirógena", *Materiales Manejados*, [En línea]. Disponible en:

<http://www.flexicon.es/Materiales-Manejados/Silice-Pirogena.html>.

- [32] TA Instruments, "ARES-G2 Rheometer", *Reómetros*, [En línea]. Disponible en: <http://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/BROCH-ARESG2-2014-EN.pdf>
- [33] W. H. Li, X. L. Gong, X. Z. Zhang, "The rheology of shear thickening fluid (STF) and the dynamic performance of an STF-filled damper", *Smart Materials and Structures*, vol. 17, n.º 3, Abril 2008. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/3/035027>. Acceso: Abril 2017.
- [34] M. Arias Vaca, "Modelo matemático de un Dispositivo de Transmisión de Choque (STU)", Trabajo de fin de Master, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, 2015.
- [35] G. Yang, B. F. Spencer Jr.<sup>a</sup>, J. D. Carlson y M. K. Sain, "Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations", *Engineering Structures*, vol. 24, n.º 3, pp.309-323, Mar. 2002. [En línea]. Disponible en: [http://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00097-9](http://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00097-9). Acceso: Abril 2017.
- [36] J. Cano, "Soluciones, Coloides y Suspensiones", *Ciencias Naturales*, 14-08-2014. [En línea]. Disponible en: <http://cienciasjokano.blogspot.com.es/2014/08/soluciones-coloides-y-suspencsiones.html>.
- [37] Real Academia Española, *Diccionario de la lengua española*, 23<sup>rd</sup> ed. Madrid: Espasa, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://dle.rae.es>.
- [38] Tiribirauri, "¿Qué es el Oxihidrógeno?", *La perfecta mezcla entre de todo y que se yo*. [En línea]. Disponible en: <http://www.tiribirauri.com/2012/11/que-es-el-oxihidrogeno.html>.
- [39] SIGMA-ALDRICH, "Ficha de datos de seguridad", *Polypropylene glycol P1,200*, 29-04-2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=81380&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=http%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fproduct%2Faldrich%2F81380%3Flang%3Des>
- [40] SIGMA-ALDRICH, "Product Information", *Silica, fumed*, 2012. [En línea]. Disponible en: [http://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigmaaldrich/docs/Sigma/Product\\_Information\\_Sheet/1/s5130pis.pdf](http://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigmaaldrich/docs/Sigma/Product_Information_Sheet/1/s5130pis.pdf)